

文章编号: 0253-2239(2007)10-1745-6

Karhunen-Loeve 及多尺度金字塔联合变换的 彩色逆半调算法*

孔月萍^{1,2} 曾 平¹ 吴自力¹

(¹ 西安电子科技大学计算机外部设备研究所, 西安 710071)
(² 西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 西安 710055)

摘要: 红绿蓝(RGB)颜色空间中的各颜色分量具有高度相关性,直接分通道实施的彩色逆半调方法会残留大量人眼敏感的半调纹理,且逆半调图像色偏较大。从分析矢量误差分散半调系统模型入手,推导其加噪特性,针对性地提出了一种 Karhunen-Loeve(K-L)及多尺度金字塔联合变换的彩色逆半调算法。算法以 K-L 变换减弱彩色分量相关性,再利用多尺度中值金字塔算子以及维纳(Wiener)滤波分离并抑制高频细节子图中的半调噪声,最后进行中值金字塔、K-L 逆变换重构结果图像。实验表明,该算法能有效去除半调噪声、减小重建图像的颜色偏差,与直接分通道逆半调算法相比峰值信噪比提高约 2~3 dB,且重建图像视觉效果良好。

关键词: 图像处理; 彩色逆半调; K-L 变换; 多尺度; 中值插值金字塔变换

中图分类号: TN911.73; TP751.1 文献标识码: A

Color Inverse Halftoning Algorithm Based on K-L and Multi-Scale Pyramid Transform

Kong Yueping^{1,2} Zeng Ping¹ Wu Zili¹

(¹ Research Institute of Computer Peripherals, Xidian University, Xian 710071)
(² College of Information and Control, Xian University of Arch. and Tech., Xian 710055)

Abstract: There is high correlation among each channel in RGB color space. If the color inverse halftoning method with discrete channel is applied there are large worms and color differences which is sensitized by human visual will be left. Based on the model of vector error diffusion the halftoning noise characteristics for color image are developed, and a color inverse halftoning method based on Karhunen-Loeve transform and multi-scale pyramid transform is presented. Using the Karhunen-Loeve transform the correlation among color components are reduced, then the halftoning noise in high frequency detail is separated and de-noised by multi-scale median interpolating pyramid transform and Wiener filter. Finally the color inverse halftone is constructed from the inverse pyramid and Karhunen-Loeve transform. Experimental results demonstrate the proposed method can remove halftoning noise effectively and overcome chromatic aberration. Peak signal-to-noise ratio is increased for about 2~3 dB higher than the color inverse halftoning method with discrete channel, and the excellent visual effect is obtained.

Key words: image processing; color inverse halftoning; Karhunen-Loeve transform; multi-scale; median interpolating pyramid transform (MIPT)

1 引 言

将连续色调图像变换为等感观半色调图像称为数字半调(Halftoning)^[1],由半色调图像重建连续色调图像称为逆半调(Inverse halftoning)。在印刷/打印图像扫描输入、传真、部分网上查询等应用

中,人们只能获得半色调图像,此时,如需进行图像识别、压缩、增强、缩放,必须首先进行逆半调处理。

多数彩色半调图像是以灰度半调法分别处理 R、G、B(红、绿、蓝)三通道,然后将处理结果叠加得到的,称为标量半调图,由于未考虑各颜色分量间的

* 国家部委预研基金(51416050205DZ0144)、陕西省自然科学基金(2004F32)和陕西省教育厅专项(04JK244)资助课题。

作者简介: 孔月萍(1965—),女,重庆人,博士研究生,副教授,主要从事图像处理及网络应用技术等方面的研究。

E-mail: kongyp@mail.xidian.edu.cn

导师简介: 曾 平(1956—),男,重庆人,教授,主要从事颜色科学、图形图像输入输出技术等方面的研究。

E-mail: zp56225@tom.com

收稿日期: 2007-03-16; 收到修改稿日期: 2007-06-29

相关性以及人眼视觉系统(HVS)的特性,图像中含有大量人眼敏感的人工纹理。为克服标量半调方法的缺陷,Doron^[2]和Niranjan^[3]分别提出了基于RGB彩色空间的明度变化最小(MBVC)、矩阵增益模型(MGM)矢量误差分散半调方法。

现有已发表的图像逆半调算法绝大多数针对灰度图,如小波方法^[4]、非线性滤波法^[5]等;仅有的几种彩色算法也针对理想半调图像^[6,7]和扫描图像^[8,9]。若用前一类方法进行标量处理会因未考虑颜色分量之间的相关性,带来颜色丢失和错乱,使重建图像出现较大颜色偏差;而后一类算法只考虑了频域滤波手段,仍然没有解决逆半调图像色偏严重的问题。本文从Karhunen-Loeve(K-L)变换入手,先减弱颜色分量的相关性,再运用中值金字塔变换实现图像细节与半调噪声的有效分离,进而提出一种高质彩色逆半调算法。由于该算法仅在空域处理,且基于滤波技术,所以运算速度较快。

2 彩色误差分散半调模型及其特性

Ulichney^[1]已证明误差分散半调(ED)是一个添加“蓝噪声”的过程,产生的半调噪声主要分布在图像的中、高频段。各通道分离处理的彩色半调,等同于认为各通道之间没有相关性,打印时墨水、炭粉是线性叠加的,然而,半调打印使用的CMYK颜色空间却是非线性的,因此,该方法产生的半调图不是最优解。Doron提出了矢量化彩色误差分散半调思想,其系统框架如图1所示,其中, $x(m)$ 为连续色调图像, $u(m)$ 为量化器输入, $e(m)$ 为量化误差, $b(m)$ 为半调输出,它们均使用 3×1 矢量形式多通道同时处理,一种常用的矢量误差分散半调核 h 矩阵如图2所示。

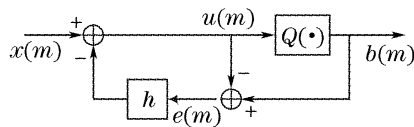


图1 矢量误差分散半调系统

Fig. 1 Diagram for vector error diffusion halftoning system

$$\begin{matrix}
 \bullet & \begin{bmatrix} 7/16 & 0 & 0 \\ 0 & 7/16 & 0 \\ 0 & 0 & 7/16 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} 3/16 & 0 & 0 \\ 0 & 3/16 & 0 \\ 0 & 0 & 3/16 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 5/16 & 0 & 0 \\ 0 & 5/16 & 0 \\ 0 & 0 & 5/16 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1/16 & 0 & 0 \\ 0 & 1/16 & 0 \\ 0 & 0 & 1/16 \end{bmatrix}
 \end{matrix}$$

图2 Floyd-Steinberg 矢量误差分散半调核 h

Fig. 2 Vector error diffusion halftoning kernel of Floyd-Steinberg

Niranjan 为了对误差分散半调系统进行最优化处理,将其中的量化器 $Q(\cdot)$ 等效为线性矩阵增益 K_s 和单位随机加性白噪声 $n(m)$ 的联合作用,由此,推出图3所示的矩阵增益矢量误差分散半调系统,其 z 域响应方程如(1)式^[3]所示:

$$B(z) = B_{\text{signal}}(z) + B_{\text{noise}}(z) = \frac{K_s}{1 + (K_s - 1)H(z)}X(z) + [1 - H(z)]N(z), \quad (1)$$

由(1)式可得

$$X(z) = \frac{1}{K_s}[1 + (K_s - 1)H(z)]B(z) - \frac{1}{K_s}[1 + (K_s - 1)H(z)][1 - H(z)]N(z), \quad (2)$$

记

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{K_s}[1 + (K_s - 1)H(z)]B(z) &= F(z), \\
 \frac{1}{K_s}[1 + (K_s - 1)H(z)][1 - H(z)]N(z) &= G(z),
 \end{aligned} \quad (3)$$

则(2)式就可看做两幅图像 $F(z)$ 与 $G(z)$ 的差。但 $X(z)$ 是原图,不含任何噪声,所以可进一步理解成 $F(z)$ 是一幅含有 $G(z)$ 噪声的彩色半调图像。简化(3)式可得

$$G(z) = \frac{1}{K_s}[1 - H(z)]^2 N(z) + H(z)[1 - H(z)]N(z), \quad (4)$$

由于 $H(z)$ 为三通道相关、低通滤波器,由(4)式可知, $G(z)$ 与 $H(z)$ 函数相关,其前项为高频噪声,后项约为零,因此,矢量误差分散半调系统叠加到输出半调图像上的是高频、颜色相关性噪声。而逆半调问题是求 $X(z)$ 的近似图像,所以,消除 $B(z)$ 的颜色分量相关性,并实现高频噪声滤波是彩色逆半调的目标。

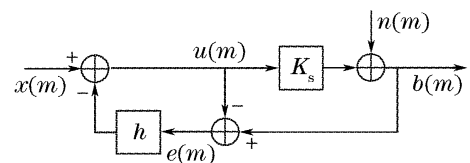


图3 矩阵增益矢量误差分散半调系统

Fig. 3 Diagram for matrix gain model of vector error diffusion halftoning system

3 K-L 及多尺度金字塔联合变换的彩色逆半调算法

3.1 K-L 及多尺度中值金字塔变换

K-L 变换是根据变换对象的统计特性构造最佳

坐标系,它通过变换将矢量投影到该坐标系中,从而改变矢量在原坐标系中的分布,削弱矢量各分量间的相关性,是一种基于目标统计特性的最佳正交变换。但传统 K-L 变换需对图像进行整体求解,导致变换矩阵过大,限制了其实用性。文献[10]利用此变换计算 RGB 图像分割时不同区域的颜色特性,从而建立了一种动态 K-L 变换,该方法首先统计彩色区域 S 中 RGB 矢量的协方差矩阵 C ; 计算该矩阵的特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, 并完成排序,使之满足 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$; 最后求出 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 对应的特征向量 $\mathbf{v}_R, \mathbf{v}_G, \mathbf{v}_B$, 得到一组可用于多种彩色图像的正交特征向量 $\mathbf{V} = (\mathbf{v}_R, \mathbf{v}_G, \mathbf{v}_B)^T, \|\mathbf{V}\| = 1, \mathbf{V}^{-1} = \mathbf{V}^T$ 。由此,一个新的彩色矢量 (I_1, I_2, I_3) 可由(5)式产生:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_R \\ \mathbf{v}_G \\ \mathbf{v}_B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中 $\mathbf{v}_R = [1/3, 1/3, 1/3], \mathbf{v}_G = [1/2, 0, -1/2]$ 或者 $\mathbf{v}_G = [-1/2, 0, 1/2], \mathbf{v}_B = [-1/4, 1/2, -1/4]$ 。因上述动态 K-L 变换满足正交和线性的特点,所以,在将彩色 (R, G, B) 分量转换成 (I_1, I_2, I_3) 时,既减弱了各

分量间的相关性,又保持了原 RGB 图像的噪声特性,因此,第二步仅需考虑各分量中半调噪声的滤除。

信号的金字塔变换采用了空间多分辨分析的思想,其分解与重构过程如图 4 所示,其中 D 与 D' 可以是线性滤波算子,也可以是非线性的。

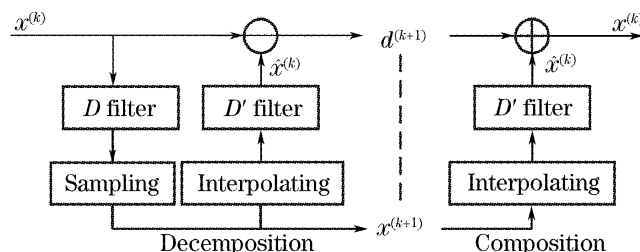


图 4 金字塔信号分解与重构

Fig. 4 Structure of pyramid decomposition and composition

Donoho^[11]运用中值算子替代原线性算子,提出了一维中值插值金字塔(MIPT)变换,有效分离并去除了信号中的高斯和柯西噪声。针对误差分散半调问题的特点,本文在文献[12]中构建了二维中值插值金字塔变换,其分解算子如(6)式,重构算子如(7)式~(11)式,其中, S 是以 (m, n) 为中心的 3×3 矩形窗。

$$\psi^k \uparrow: \psi \uparrow(x^{k+1})(m, n) = \text{median}\{x^k(2m + p, 2n + q) \mid (p, q) \in S\}, \quad (6)$$

$$\psi^k \downarrow: \psi \downarrow(\hat{x}^k)(2m, 2n) = \text{median}\{x^{k+1}(m, n)\}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \psi \downarrow(\hat{x}^k)(2m, 2n + 1) &= \text{median}\{x^{k+1}(m - 1, n), x^{k+1}(m, n), x^{k+1}(m + 1, n), \\ &\quad x^{k+1}(m - 1, n + 1), x^{k+1}(m, n + 1), x^{k+1}(m + 1, n + 1)\}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \psi \downarrow(\hat{x}^k)(2m + 1, 2n) &= \text{median}\{x^{k+1}(m, n - 1), x^{k+1}(m, n), x^{k+1}(m, n + 1), \\ &\quad x^{k+1}(m + 1, n - 1), x^{k+1}(m + 1, n), x^{k+1}(m + 1, n + 1)\}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \psi \downarrow(\hat{x}^k)(2m + 1, 2n + 1) &= \text{median}\{x^{k+1}(m, n), x^{k+1}(m, n + 1), x^{k+1}(m + 1, n), \\ &\quad x^{k+1}(m + 1, n + 1)\}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$d^k(m, n) = x^k(m, n) - \hat{x}^k(m, n). \quad (11)$$

因直接使用中值算子无法还原连续色调的全部灰度级,故先对动态 K-L 变换后的误差分散半调图 $b(m, n)$ 进行小尺度高斯低通滤波,将其变换为细节基本无损的预处理连续色调图像 $I(m, n)$; 然后对原图 $x(m, n)$ 和预处理图 $I(m, n)$ 进行 3 级中值插值金字塔变换,计算两者在各级细节信号 $\{d_x^1, d_x^2, d_x^3\}$ 与 $\{d_i^1, d_i^2, d_i^3\}$ 上系数的概率密度函数(PDF)分布,分析半调噪声经 K-L 变换和中值插值金字塔变换后的分布特征。我们选择了 30 幅不同内容的典型图像进行了上述处理,发现半调预处理图像 $I(m, n)$ 经上述变换后具有如下特点。

1) 观察彩色矩阵增益模型半调图经 K-L 及中值插值金字塔变换后的结果,可看出分解后的一级

近似图上几乎不含噪声,一级细节图 $d_{i1}^2, d_{i2}^2, d_{i3}^2$ 受半调噪声污染最严重,结果之一如图 5 所示。

2) 将原图及其彩色矩阵增益模型半调图做 K-L 及中值插值金字塔变换后,对比各级细节系数的概率密度函数分布,可以发现 $d_i^1(m, n)$ 与原图 $d_x^1(m, n)$ 的差异最大,在以后几级中逐渐趋于相似。其中, Lena 图像的概率密度函数对比结果如图 6 所示,实线为原始信号细节系数概率密度分布,虚线为半调预处理信号细节系数概率密度分布。其次,计算了 30 幅图像经上述处理后其概率密度分布与原始信号的概率密度分布的差异均值,结果如表 1。这从另一个角度说明半调噪声绝大部分集中在变换后的一级细节图像上,而且,半调噪声主要引起概率密度分布的水平飘移。

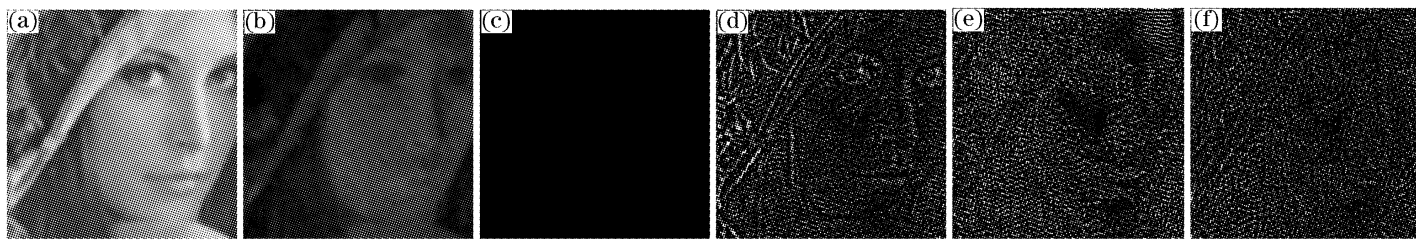


图 5 (a),(b),(c)分别为矩阵增益模型半调图经 K-L 及中值插值金字塔变换后的一级近似图,(d),(e),(f)分别为变换后的一级细节图

Fig. 5 (a),(b) and (c) are the approximations of MGM halftoning decomposed by K-L & MIPT transform on 1-scale, (d),(e) and (f) are the details of MGM halftoning decomposed by K-L & MIPT transform on 1-scale

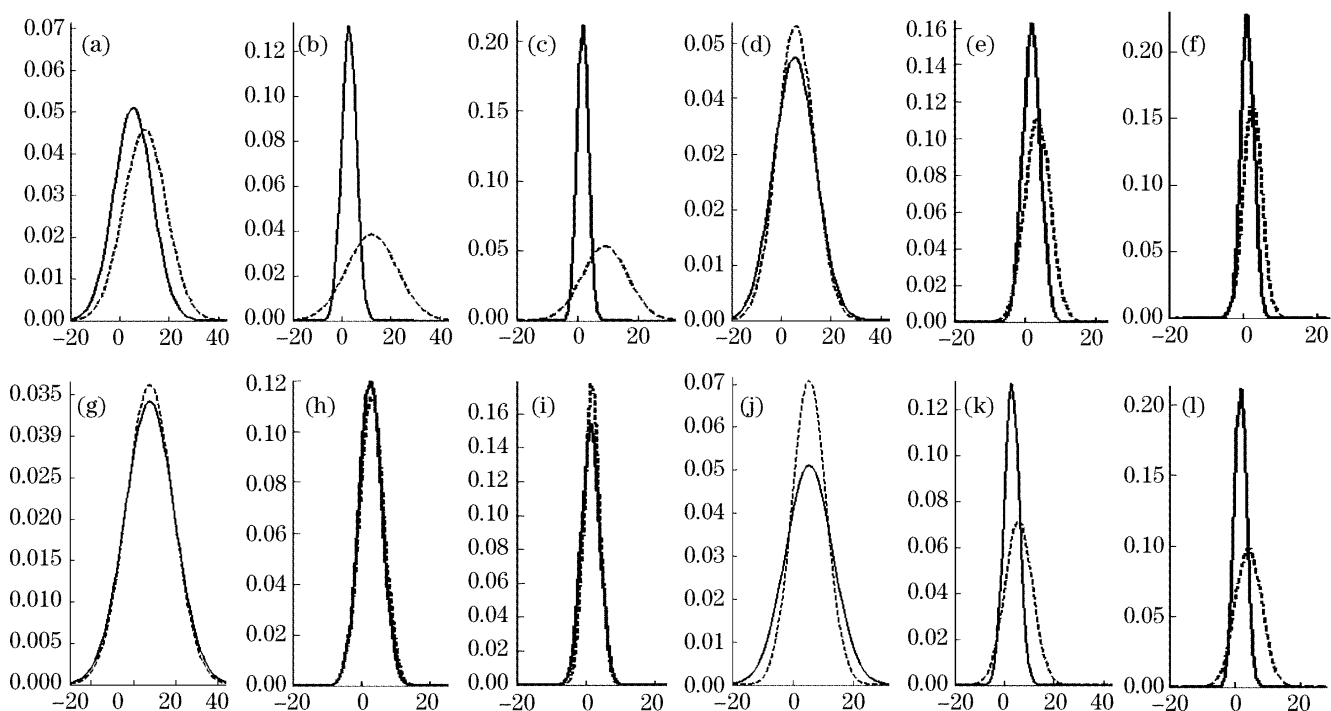


图 6 (a),(b),(c) K-L 及中值插值金字塔变换后的一级细节系数概率密度函数对比,(d),(e),(f)为变换后的二级细节系数概率密度函数对比,(g),(h),(i)为变换后的三级细节系数概率密度函数对比,(j),(k),(l)为 K-L 及中值插值金字塔变换一级细节系数维纳滤波后概率密度函数对比

Fig. 6 (a),(b) and (c) are the compare of Probability Distribute Function (PDF) on detail coefficients of MGM halftoning that are decomposed by K-L & MIPT transform on 1-scale. The solid line is corresponding to original, and the dash line is halftoning, (d),(e) and (f) are the compare of PDF for 2-scale, (g),(h) and (i) are the compare of PDF for 3-scale, then (j),(k) and (l) are the filtering result of (a),(b) and (c) by Wiener filter

表 1 30 幅矩阵增益模型半调图与其原图 K-L 及中值插值金字塔变换后细节系数的概率密度函数偏移均值

Table 1 Average offset on horizontal & vertical about details of MGM halftones decomposed by K-L & MIPT transform on 1~3 scale for 30 images

	Hor. $_I_1$	Ver. $_I_1$	Hor. $_I_2$	Ver. $_I_2$	Hor. $_I_3$	Ver. $_I_3$
Offset $d^1(m,n)$	3.7062	0.0098	10.3051	0.1402	7.7022	0.2519
Offset $d^2(m,n)$	0.4060	0.0052	2.1050	0.0542	1.4040	0.1517
Offset $d^3(m,n)$	0.1020	0.0025	0.4020	0.0183	0.1030	0.0732

3) 针对含噪严重的 $d^1_x(m,n)$ 分别采用维纳、样条、形态滤波器以及阈值法^[11] 消噪, 并比对、分析它们消噪后的概率密度函数分布, 其中, 维纳滤波的结果与原 $d^1_x(m,n)$ 最接近[参见图 6(j)~图 6(l)及表 2]。

表 2 30 幅矩阵增益模型半调图像 K-L 及中值插值金字塔变换一级细节系数滤波后概率密度函数偏移均值

Table 2 Average offset on horizontal & vertical about $d^1(m,n)$ which is filtering by Wiener filter for 30 images

	Hor. $_I_1$	Ver. $_I_1$	Hor. $_I_2$	Ver. $_I_2$	Hor. $_I_3$	Ver. $_I_3$
Offset $d^1_w(m,n)$	2.4050	0.0204	4.1030	0.1109	3.0010	0.2081

3.2 K-L 及中值插值金字塔联合变换的彩色逆半调算法

依据前述矢量误差分散半调图像 K-L 及中值插值金字塔变换后的噪声分析结果,参照小波^[4]及中值金字塔^[11,12]去噪的基本原理,提出 K-L 及中值插值金字塔联合变换的彩色逆半调算法,其信息处理流程如图 7。其中,K-L 变换产生削弱颜色相关性的彩色图像 I ,它的三分量可用 I_1, I_2, I_3 表示,对每个独立分量 I_i 进行中值插值金字塔分解,考虑到

执行效率以及中值插值金字塔变换后半调噪声主要分布在细节序列 $\{d_1^i, d_2^i, d_3^i, \dots\}$ 中 d_1^i 上的事实,算法仅对一级细节图 d_1^i 进行维纳非线性自适应滤波,得到滤波后细节信号 dw_1^i ,再用消噪后的 dw_1^i 与一级近似图 I^1 进行中值插值金字塔重构,生成逆半调图 \hat{I} ;因中值插值金字塔重构时采用了(7)式~(11)式定义的中值插值,会引入少量非线性脉冲噪声,为此增加后处理中值滤波,最后经 K-L 逆变换生成逆半调结果 y 。

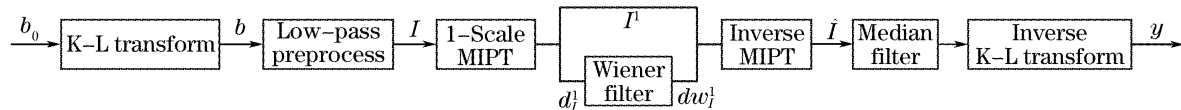


图 7 K-L 和中值插值金字塔彩色逆半调算法处理流程图

Fig. 7 The block diagram of the color inverse half-toning based on K-L and MIPT transform

4 实验验证

本文以 $512 \times 512 \times 24$ bit 图像为素材在计算机上进行了仿真。图 8(c) 为矩阵增益模型半调图的 K-L 和中值插值金字塔逆半调结果,其视觉效果平滑、边缘清晰。表 2 为前述 30 幅图像经 K-L 和中值插值金字塔逆半调的统计数据,与表 1 相比,该算法将 d_1^i 与 dw_1^i 的概率密度函数平均绝对误差分别从 21.7135 和 0.4019 减小到 9.509 和 0.3394,水平、垂直方向合计纠偏 12.267,最终结果的平均绝对误差和仅为 9.8484。其次,运用本文算法以及小波(Wavelet^[4])逆半调算法的分通道扩展,测试了 Peppers、Lena 图像,其结果之一如图 8 所示;峰值

信噪比值及 CIELab 均方根色差^[13,14]值如表 3 所示,显然,本文算法处理结果的峰值信噪比值提高了 2.5~2.7dB,且色差 ΔE 减小了约 0.74~0.2。此外,文献[6]所提出的分通道查表法(LUT)彩色逆半调算法在处理 30 幅图像时,得到的平均峰值信噪比值仅为 26.49 dB;文献[7]所提出的矢量量化逆半调算法在处理 Lena 图像的分通道 Floyd-Steinberg 半调图时,结果的峰值信噪比值达到 30.01 dB,这从另一个方面说明逆半调算法构建过程中,考虑彩色分量的相关性可以减少颜色丢失和错乱,提高重建图像质量。



图 8 矩阵增益模型半调图像逆半调结果。(a)矩阵增益模型半调图,(b) Wavelet 逆半调图,(c) K-L 和中值插值金字塔逆半调图

Fig. 8 (a) is MGM color halftone, (b) and (c) are color inverse half-toning for Wavelet and K-L & MIPT method

表 3 不同逆半调算法对矩阵增益模型半调图像逆半调的峰值信噪比值(dB)及 CIELab 色差值

Table 3 Performance comparison of inverse half-toning algorithms on terms of PSNR and color difference of CIELab

Quality assessment parameters	PSNR /dB		ΔE	
	Wavelet[4]	K-L & MIPT	Wavelet[4]	K-L & MIPT
Inverse half-toning method				
Peppers	26.1946	28.8915	9.3730	8.6358
Lena	27.0703	29.5687	7.1373	6.9384

5 结 论

本文从彩色矢量半调的系统特性出发,利用动态 K-L 及中值插值金字塔联合变换,既减弱了颜色分量相关性,又有效分离出半调噪声,在实验统计变换后半调噪声分布规律的基础上,构建了一种快速、高质彩色逆半调算法。仿真结果显示该方法不仅保持了图像的重要细节,而且峰值信噪比值及 CIELab 色差均有所改善,效果优于分通道处理方法。

参 考 文 献

- 1 R. A. Ulichney. *Digital Halftoning* [M]. Cambridge: MIT Press, 1987. 233~331
- 2 D. Shaked, N. Arad, A. Fitzhugh *et al.*. Color diffusion; error-diffusion for color halftones[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3648**: 459~465
- 3 N. D. Venkata, B. L. Evans. Design and analysis of vector color error diffusion halftoning systems[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, **10**(10): 1552~1556
- 4 Z. Xiong, M. T. Orchard, K. Ramchandran. Inverse halftoning using wavelet [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, **8**(10): 1479~1483
- 5 Mei-yin Shen, C. C. Jay Kuo. A robust nonlinear filtering approach to inverse halftoning[J]. *J. Visual Communication and Image Representation*, 2001, **12**(1): 84~95
- 6 M. Mese, P. P. Vaidyanathan. Look-up table method for inverse halftoning[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, **10**(10): 1566~1578
- 7 Jim Z. C. Lai, J. Y. Yen. Inverse error-diffusion using classified vector quantization [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, **7**(12): 1753~1758
- 8 Y. M. Han, J. M. Kim, M. H. Kim. A new moire smoothing method for color inverse halftoning[C]. *International Conference on Image Processing*, 2002, **1**: 820~823
- 9 C. H. Kuo, A. R. Rao, G. Thompson. Color halftone descreening based on color sigma filters[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4300**: 377~385
- 10 Y. Ohta, T. Kanade, T. Sakai. Color information for region segmentation[J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1980, **13**(3): 222~241
- 11 D. L. Donoho, T. P. Y. Yu. Robust nonlinear wavelet transform based on median-interpolation [C]. *Proceedings of Signals, System & Computers*, 1997, **1**: 75~79
- 12 Kong Yueping, Zeng Ping, Zheng Haihong *et al.*. Inverse halftoning based on the median pyramid [J]. *J. Xidian University*, 2006, **33**(6): 917~921 (in Chinese)
孔月萍,曾平,郑海红等. 基于中值金字塔变换的图像逆半调[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2006, **33**(6): 917~921
- 13 Wang Xichang, Zhou Fengkun, Chen Shufang *et al.*. Design and study on color sensitive function[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(8): 1057~1064 (in Chinese)
王喜昌,周丰昆,陈淑芳等. 颜色灵敏函数的设计及其规律的研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(8): 1057~1064
- 14 Wang Zhehong, Xu Haisong. Lightness threshold evaluation in visual color matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1274~1278 (in Chinese)
汪哲弘,徐海松. 颜色视觉匹配中明度阈值的评价[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1274~1278