

基于 K-means 聚类的数字半色调算法^{*}

何自芬^a, 詹肇麟^b, 张印辉^{a†}

(昆明理工大学 a. 机电工程学院; b. 材料科学与工程学院, 昆明 650093)

摘要: 数字半色调是在二值设备或多色二值设备上实现图像再现的一门技术, 提出将 K-means 聚类法应用在数字半色调技术中。算法中应用人类视觉系统模型(HVS)和印刷模型最大限度减少原始灰度连续调图像和半色调图像之间的视觉误差; 利用 K-means 聚类法将灰度图像划分成聚类分区, 在每个聚类分区应用最小平方方法(least-squares)最小化二值半色调图像和原始灰度级图像之间的平方误差, 所构造的半色调算法与基于模型的最小平方方法(LSMB)算法相比, 随着聚类分区的增加, 图像平滑且边缘清晰度增加, 尤其是在图像细节部位。与 LSMB 算法比较, 该算法的均方误差值有所降低, 而权重信噪比和峰值信噪比提高了 0.2 ~ 2 dB, 模拟实验结果验证了算法的有效性。

关键词: 数字半色调; K-means 聚类; 人类视觉模型; 基于模型的最小平方方法

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2013)01-0307-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.079

Digital halftoning algorithm based on K-means clustering

HE Zi-fen^a, ZHAN Zhao-lin^b, ZHANG Yin-hui^{a†}

(a. Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, b. Faculty of Materials Science & Engineering, Kunming University of Science & Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Halftoning is a method for creating the illusion of continuous tone output with a binary device. This paper applied K-means clustering method to digital halftoning. The algorithm applied both a printer model and a model for the human visual system (HVS) to further minimize the perceived error between the continuous original image and the halftone image. Firstly, the method partitioned the gray image into two, three and four regions using K-means image segmentation method. Each clustering region used the least-squares model-based (LSMB) algorithm. Analysis and simulation results show that the proposed algorithm can produce better image smoothing and edge sharpness, especially the parts of image detail while increasing the number of clustering. Compared with the LSMB algorithm, it decreases the mean square error(MSE) performance for the proposed algorithm, increases the weighted signal-to-noise ratio(WSNR) and the peak signal noise ratio (PSNR) performance for proposed algorithm by 0.2 to 2 dB. Experimental results indicate the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: digital halftoning; K-means clustering; human visual system; least-squares model-based

0 引言

半色调技术也称做加网技术, 是将图像离散为像素图案, 用不连续的网点来实现印刷品上层次的浓淡变化。许多图像再现技术, 如激光雕刻凹版、激光打印机、激光制版和数码打印机, 只有二进制输出, 在纸上或印版上的输出有两种状态, 即打点或不打。单独的一个点上只能表现有色或无色, 而原始图像的每一个像素都有丰富的灰度信息, 如何将一幅色彩丰富的图像尽量不失真地表现出来的技术就是一直受到极大关注的数字半色调技术。数字半色调技术是基于人眼的视觉特性和图像的成色特性, 利用数学、计算机等工具, 在二值设备或多色二值设备上实现图像再现的一门技术^[1]。数字半色调算法可分为抖动法、误差扩散法和迭代优化方法三类^[2]。尽管所有的半色调算法都或多或少地依赖于人眼和显示设备的特性, 基于模型的半色调技术却旨在建立较为准确的视觉系统(human

visual system, HVS)模型和印刷模型, 进一步优化半色调算法的精确性^[3]。本文提出在数字半色调技术中应用 K-means 聚类法, 并在算法中采用 HVS 和印刷模型, 所构造的半色调算法与基于模型的最小平方方法(least-squares model-based halftoning)^[4]比较, 随着聚类分区的增加, 所得到的半色调图像越平滑且边缘清晰度增加。

1 人类视觉模型和印刷模型

1.1 人类视觉模型

HVS 模型在 20 世纪 90 年代初被逐渐引入数字半色调方法中。半色调之所以能够模拟连续调图像是依赖于 HVS 的低通或带通滤波器特性, 而且半色调图像的质量最终由 HVS 进行评价, 因此视觉系统的研究在半色调算法的设计中是十分重要的。

如将图像从空间域变换到频域, 那么频率越高, 人眼的分

收稿日期: 2012-05-21; **修回日期:** 2012-06-29 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60962007); 昆明理工大学人才培养基金资助项目(2011-02)

作者简介: 何自芬(1976-), 女(满族), 山西阳泉人, 博士研究生, 主要研究方向为图像处理、机器视觉和微纳制造技术; 詹肇麟(1964-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为表面工程、微纳制造技术和表面腐蚀与防护; 张印辉(1977-), 男(通信作者), 河北故城人, 副教授, 博士, 主要研究方向为图像处理、机器视觉和机器学习(yinhui_z@yahoo.com.cn)。

辨能力就越低;频率越低,人眼的分辨能力就越高,这就是HVS的频域特性。由人眼对高频细节敏感性较低可知,人眼相当于一个低通滤波器。通过 Mannos 等人^[5]的 HVS 模型可以很好地预测编码图像的质量。

$$H_r(f_r) = 2.6 \times (0.0192 + 0.114f_r) \exp\{-(0.114f_r)^{1.1}\} \quad (1)$$

频率 $f_r = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ 是水平频率 f_x 和垂直频率 f_y 的有效值,单位是 cycles/deg。如图 1 所示,滤波器具有带通特性,频率峰值是 7.9 cycles/deg。

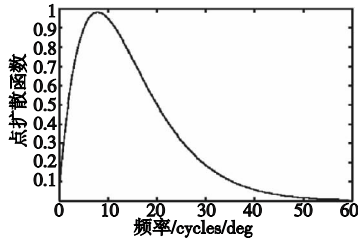


图1 对比敏感度函数

1.2 印刷模型

采用打印机模型的目的是准确地预测产生的实际灰度等级;此外,它的形式很容易组合在半色调算法中。基于模型的半色调技术应用了打印机模型,可产生高质量的半色调图像。

一种简单的打印机模型称为圆形网点叠印模型^[6]。

$$p_{i,j} = P(W_{i,j}) = \begin{cases} 1 & \text{if } b_{i,j} = 1 \\ f_1\alpha + f_2\beta - f_3\gamma & \text{if } b_{i,j} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中:窗函数 $W_{i,j}$ 包括 $b_{i,j}$ 及其 8 邻域系统,如图 2 所示; f_1 表示水平和垂直方向黑色网点; f_2 表示对角方向黑色网点和不相邻的黑色网点; f_3 表示一个是水平方向,一个是垂直方向成对相邻的黑色网点; α 、 β 和 γ 是阴影部分面积的比率。

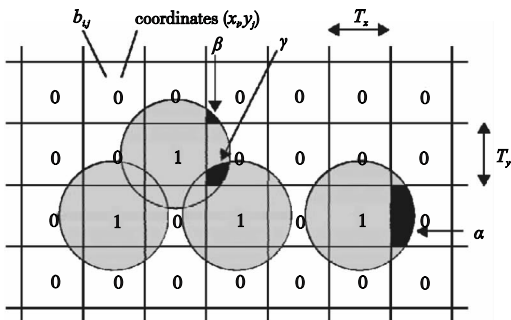


图2 实际圆形网点叠印模型($\rho=1.25$)

2 基于模型的最小平方数字半色调

LSMB 方法^[4]试图产生最佳的半色调复制图像,最小化二值半色调图像和原始灰度级图像之间的平方误差,如图 3 所示。

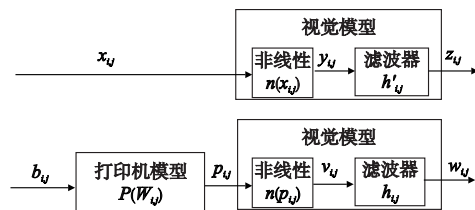


图3 基于模型的最小平方半色调算法

假设一副灰度级图像 $[x_{i,j}]$, $x_{i,j}$ 表示像素位于网格 i 行和 j 列,每个像素的灰度等级从 0(白色)到 1(黑色),假定一个网点可以产生一个像素,因此,灰度级图像 $[x_{i,j}]$ 和二值图像 $[b_{i,j}]$ 有相同的尺度。给定如式(2)所示的打印机模型的滑动窗形式和第 1 章表述的人类视觉模型,应用 LSMB 方法最小化

平方误差。

$$E = \sum_{ij} (z_{ij} - w_{ij})^2 \quad (3)$$

$$z_{ij} = n(x_{ij}) * h'_{ij} \quad (4)$$

$$w_{ij} = n(p_{ij}) * h_{ij} \quad (5)$$

$$p_{ij} = P(W_{ij}) \quad (6)$$

其中: $w_{i,j}$ 是由 $b_{i,j}$ 和式(2)所示的邻域系统;*表示卷积; $h_{i,j}$ 和 $h'_{i,j}$ 表示半色调图像和连续调图像的视觉滤波器不同的脉冲响应。边界条件是假定没有油墨处在图像边缘之外。视觉滤波器的设计是观视距离 24 英寸和印刷分辨率 300 DPI,起始点为随机。

3 基于 K-means 聚类法的数字半色调

本文提出一种基于 K-means 聚类的最小平方方法,该算法首先利用 K-means 聚类法对输入图像进行图像分割,划分成不同的聚类分区,在每个分区中最小化二值半色调图像和原始灰度级图像之间的平方误差,得到最佳半色调图像。

3.1 利用 K-means 聚类法对图像进行区域划分

图像分割的目标是将数字图像划分为若干个不相交的区域。聚类分析的基本指导思想是同一类间的目标区域间的像素之间的距离尽可能地小,不同类之间的像素之间距离尽可能地大。

K-means 聚类法可以根据图像的深浅对目标图像进行分割,是一种被广泛应用于科学研究和工业应用中的经典聚类算法^[7]。算法的核心思想是把 n 个数据对象划分为 k 个聚类,使每个聚类中的数据点到该聚类中心的平方和最小,算法处理过程如下:

输入:聚类个数 k , 包含 n 个数据对象的数据集。

输出: k 个聚类。

a) 从 n 个数据对象中任意选取 k 个对象作为初始的聚类中心。

b) 分别计算每个对象到各个聚类中心的距离,把对象分配到距离最近的聚类中。

c) 所有对象分配完成后,重新计算 k 个聚类的中心。

d) 与前一次计算得到 k 个聚类中心比较,如果聚类中心发生变化,转 b), 否则转 e)。

e) 输出聚类结果。

首先从 n 个数据对象中任意选择 k 个对象作为初始聚类中心,而对于所剩下的其他对象,则根据它们与这些聚类中心的相似度,分别分配给与其最相似的聚类;然后再计算每个新聚类的聚类中心(该聚类中所有对象的均值)。不断重复这一过程直到标准测度函数开始收敛为止。一般都采用均方差为标准测度函数,具体定义为

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{p \in G_i} |p - m_i|^2 \quad (7)$$

其中: E 为数据库中所有对象的均方差之和; p 为代表对象的空间中的一个点; m_i 为聚类 G_i 的均值(p 和 m_i 均是多维的)。

式(7)所示聚类标准旨在使所获得的 k 个聚类具有各聚类本身尽可能地紧凑、而各聚类间尽可能地分开的特点。

一般情况下,K-means 聚类算法在分类区域内不会达到全局最小化。事实上,该算法采用离散分类方法而不是连续参数法,它所达到的“最小”只能收敛于局部最小值。

3.2 半色调误差域和最小平方方法

定义 $|\Omega| = N = n \times m$ 为原图像域包含的像素个数,半色调

图像 b 是一个二值映射: $b: \Omega \rightarrow \{0, 1\}$, 给定一幅连续调图像 x 和半色调图像 b , 定义感知误差域 $e = e(b|x) = K[x] - K[b] = u - K[b]$, 则 $u = K[x]$ 。在 HVS 中, K 为操作因子, $K: x \rightarrow K[x]$ 。最小平方半色调就是寻找半色调图像来最小化整个方差。

$$D(b|u) = D_K(b|u) = \sum_{\alpha \in \Omega} (u_{\alpha} - K[b]_{\alpha})^2 = \|e(b|u)\|_2^2 \quad (8)$$

4 实验结果与分析

采用 256×256 像素的 Lena 灰度图进行实验, 打印机分辨率为 300 DPI, 视觉距离为 24 英寸。本次实验对比了两种算法, 即 LSMB 算法和本文所提出的算法。

应用 K-means 聚类法确定聚类的类数和距离量度, 以确定被分成的类数和衡量像素之间的相似程度。使用欧氏距离度量将图像聚成 2 类、3 类和 4 类, 每一类用不同的标号显示, 如图 4~10 所示。



图4 原始灰度图像 图5 聚类标号 $K=2$ 时生成的图像 图6 聚类分割的图像($k=1, 2$)



图7 聚类标号 $K=3$ 时生成的图像 图8 聚类分割的图像($k=1, 2, 3$)



图9 聚类标号 $K=4$ 时生成的图像 图10 聚类分割的图像($k=1, 2, 3, 4$)

从图 5~10 可以看出, 在聚类生成的两块、三块和四块区域中, 每块区域用原来的颜色显示, 区域外的颜色显示为 0, 即为黑色。在每个聚类区间应用 LSMB 算法得到如图 11 所示的半色调图像。



图11 应用LSMB算法和本文算法得到的Lena半色调图

为了测试生成半色调图像的质量, 本文应用了质量评价参

数均方误差 (MSEv)、权重信噪比 (MSNR) 和峰值信噪比 (PSNR) 对图像进行了对比^[8], 对比结果如表 1 和图 12~14 所示。图 12~14 中, I 表示 LSMB 算法, II、III 和 IV 分别表示本文算法的不同聚类区间。

表1 不同半调算法对 Lena 半调图的比较

算法	聚类分区	MSEv	WSNR/dB	PSNR/dB
LSMB		0.127 5	24.776 5	26.56
本文算法	2	0.119 9	24.955 1	26.69
	3	0.043 7	25.715 6	26.75
	4	0.014 9	26.770 7	28.59

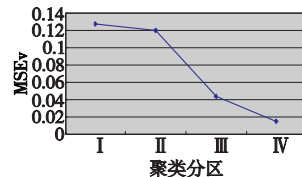


图12 MSEv值对比

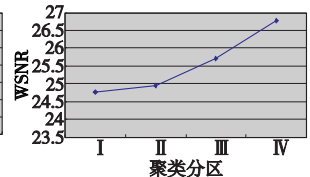


图13 WSNR值对比

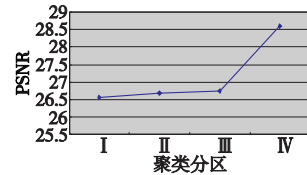


图14 PSNR值对比

从对比结果可以看出, 随着聚类区间的增加, MSEv 值有所降低, 而 WSNR 和 PSNR 值都在增加。

5 结束语

本文给出了一种基于聚类分析的半色调算法。应用 K-means 聚类法将原图像分割成几个聚类空间, 在每个聚类空间利用基于模型的最小平方产生半色调图像。在算法设计中融合了人类视觉模型和印刷模型, 使得到的半色调图像更符合人类视觉特性。随着聚类区间的增加, 该算法可以产生较好的半色调图像, 特别是在图像细节部分。模拟结果表明, 本文提出的算法与 LSMB 算法比较, 半色调图像的 MSEv 值有所降低, 而 WSNR 和 PSNR 值都提高了 0.2~2 dB。

参考文献:

- [1] BOUMAN C A. Digital halftoning [EB/OL]. (2012-01-09). https://engineering.purdue.edu/~bouman/ece637/notes/pdf/Half_toning.pdf.
- [2] ALLEBACH J P. Selected papers on digital halftoning [M]. Bellingham; SPIE Milestone Series, 1999.
- [3] PAPPAS T N, ALLEBACH J P, NEUHOFF D L. Model-based digital halftoning [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2003, 20 (7): 14-27.
- [4] PAPPAS T N, NEUHOFF D L. Least-squares model-based halftoning [J]. IEEE Trans on Image Processing, 1999, 8(8): 1102-1116.
- [5] MANNOS J L, SAKRISON D J. The effects of a visual fidelity criterion on the encoding of images [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1974, 20(4): 525-536.
- [6] PAPPAS T N, NEUHOFF D L. Printer models and error diffusion [J]. IEEE Trans on Image Processing, 1995, 4(1): 66-80.
- [7] BISHOP C M. Neural networks for pattern recognition [M]. Oxford: Oxford University Press, 1995.
- [8] WANG Zhou, BOVIK A C. A universal image quality index [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2001, 9(3): 81-84.