

## 随机中心聚集半色调算法

刘艳鹤<sup>1</sup>, 苏海<sup>2</sup>

(1.武汉大学, 武汉 430072; 2.华南师范大学, 广州 510631)

**摘要:** **目的** 由误差扩散半色调算法得到的二值图像存在明显的规律性纹理, 针对该问题提出随机中心聚集半色调算法。**方法** 利用蓝噪声半色调阈值矩阵算法生成随机均匀分布的种子点, 采用三角网生长算法构建 Delaunay 三角网格, 在确定三角网像素成员后, 根据像素点在三角形区域内的分布位置得到该位置像素的阈值, 最后通过将连续调图像与阈值矩阵的阈值比较得到半色调图像。**结果** 同误差扩散算法相比, 提出的方法可以减少半色调图像的人工纹理, 图像视觉效果较好。**结论** 文中算法可以改善半色调图像质量, 实验结果证明了该方法的有效性。

**关键词:** 蓝噪声; Delaunay 三角网; 随机中心聚集半色调算法; 规律性纹理

**中图分类号:** TS801.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)21-0199-05

## Stochastically Seeded Clustered Halftone Algorithm

LIU Yan-he<sup>1</sup>, SU Hai<sup>2</sup>

(1.Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2.South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

**ABSTRACT:** The work aims to propose the stochastically seeded clustered halftone algorithm with respect to the problem that the binary image obtained by error diffusion halftone algorithm has obvious structured artifacts. The stochastically seeded dots were generated by means of blue noise halftone threshold matrix algorithm. The Delaunay triangulation network was constructed with the triangulation network growth algorithm. After the pixel members of triangulation network were confirmed, based on the position of pixel points distributed in the triangular area, the threshold of pixels at such position was obtained. Finally, the halftone images were obtained after the comparison on the thresholds of continuous-tone image and the threshold matrix. Compared with the error diffusion algorithm, the proposed method could reduce the artificial texture of halftone images, so that the images had better visual effects. The proposed algorithm can improve the quality of the halftone images, and the experimental results illustrate the effectiveness of such method.

**KEY WORDS:** blue noise; Delaunay triangulation network; stochastically seeded clustered halftone algorithm; structured artifacts

图像输入设备采集到的图像阶调由深到浅连续变化, 而许多图像输出设备如喷墨打印机、激光打印机等都只能接收二值图像信息, 即记录和不记录 2 种情况, 因此, 需要借助数字图像半色调技术将连续调图像转化为二值图像。数字图像半色调技术利用人眼的低通滤波特性, 通过特定的半色调算法使人眼观察到的二值图像的局部灰度平均值尽可能地接近输入图像的局部灰度平均值, 从而在视觉上产生连续调图像的再现效果。数字图像半色调技术是决定图像输出质量的关键技术之一, 目前, 该技术在印刷机、打印

机、户外广告制作、显示屏幕、图像压缩等领域都得到了广泛应用, 因此研究数字图像半色调方法具有一定的实用价值<sup>[1]</sup>。

### 1 数字图像半色调化算法分类

#### 1.1 迭代过程半色调化算法

根据数字图像半色调化算法的计算特点, 图像半色调化算法可以分为迭代过程半色调算法、相邻过程半色调算法、点过程半色调算法三大类<sup>[2]</sup>。迭代过程

半色调化算法首先通过其他半色调化算法得到初始二值图像,然后调整半色调结果,计算半色调图像同连续调图像的误差,如果误差变小,则接受此次调整,否则取消本次调整。按照上述原则依次迭代循环,直到误差达到最小值并保持不变时结束循环,得到二值输出图像。直接二元搜寻法是典型的迭代过程半色调算法,借助这种方法可以得到高质量的半色调图像,但是该算法需要对每一个像素进行半色调输出调整,因此计算量大,程序运行时间长<sup>[3]</sup>。

## 1.2 相邻过程半色调化算法

相邻过程半色调化算法对连续调图像的某一像素点区域进行处理,其代表算法是误差扩散。误差扩散将连续调图像的像素点值转换为半色调图像的像素点,将两者间的灰度差分散到与当前像素点相邻的未处理的像素点上,因此可以保证图像处理前后区域面积内的平均像素点值不变,减小图像的像素误差<sup>[4]</sup>。误差扩散过程中使用的滤波器在图像半色调处理时周期性地出现,因此会出现“蠕虫”效应,这是误差扩散算法的缺点之一<sup>[5]</sup>。

## 1.3 点过程半色调化算法

点过程半色调化算法将连续调图像的像素点值和阈值矩阵中的阈值进行比较,根据它们之间的大小关系确定像素点的半色调化处理结果,算法的核心在于如何设计阈值矩阵,阈值矩阵的大小及阈值分布情况直接影响着半色调图像的视觉效果<sup>[6]</sup>。

根据网点的分布规律,阈值矩阵可以分为调幅阈值矩阵、调频阈值矩阵和混合阈值矩阵。调幅半色调算法通过网点的大小再现图像的灰度级,因网点在空间分布上具有规律性和周期性,所以由此得到的半色调图像会存在明显的规律性纹理<sup>[7]</sup>。调频半色调算法借助网点的出现频率再现图像的明暗变化,网点分布随机,所以由调频半色调算法得到的二值图像不存在人工纹理,但是因为网点较小,网点的周长面积比较大,在打印输出过程中网点扩大严重,对图像的再现质量产生不利影响。基于此,研究人员提出了混合阈值矩阵的加网思想,即通过同时改变网点的大小和分布频率再现图像的阶调层次<sup>[8]</sup>。

点过程半色调算法计算简单,运算复杂度低,因此文中选择该半色调算法对图像进行二值化处理。针对半色调图像存在的规律性纹理问题,文中在前人研究的基础上,参照混合矩阵的研究思路,提出了基于 Delaunay 三角网的随机中心聚集半色调算法,其算法流程为:生成随机种子点→构造 Delaunay 三角形网格→确定每个三角形的像素成员→计算阈值→二值化。

## 2 随机中心聚集半色调算法

### 2.1 随机种子点的生成

在数字图像半色调化过程中,均匀随机分布的网点有利于避免规律性纹理,改善图像阶调的再现效果。研究中提到的随机种子点是指三角形网格中的三角形顶点,随机种子点的分布状况决定了三角网格划分的均匀程度,进而会影响到阈值矩阵中阈值的取值情况,因此,随机种子点的均匀随机分布问题是文中需要解决的首要问题<sup>[9]</sup>。因为由蓝噪声阈值矩阵计算得到的半色调图像网点离散均匀分布,不存在人工纹理,所以文中选择蓝噪声阈值矩阵半色调算法获得随机种子点<sup>[10]</sup>。研究中利用蓝噪声阈值矩阵半色调算法对网点百分比为 6% 的灰度块进行加网,由此得到的打印点即像素种子点。

### 2.2 构造三角形网格

#### 2.2.1 Delaunay 三角网的定义及性质

设给定平面上有  $k$  个点的集合  $A$ ,  $A=\{A_i|i=1, 2, 3 \dots k\}$ , 三角剖分是指用互不相交的直线段连接点  $A_m$  和点  $A_n$ ,  $1 \leq m, n \leq k, m \neq n$ , 并使每个区域都是三角形。三角剖分中的任意一个三角形都对应一个外接圆,如果每一个外接圆除三角形顶点外,不包含点集  $A$  中的其他点,则称该三角形为 Delaunay 三角形,由此形成的网格称为 Delaunay 三角形网格<sup>[11]</sup>。由 Delaunay 三角形的定义可知, Delaunay 三角剖分需满足两大准则<sup>[12]</sup>。

1) 第 1 准则(空外接圆准则)。Delaunay 三角形是唯一的,即由 Delaunay 三角剖分得到的任意三角形的外接圆不包含点集中的其他点元素。如图 1a 所示,三角形  $ABC$  的外接圆包含除顶点  $A, B, C$  以外的点  $D$ , 不符合空外接圆准则,图 1b 中的三角形剖分满足空外接圆准则,所以得到的三角形是 Delaunay 三角形。

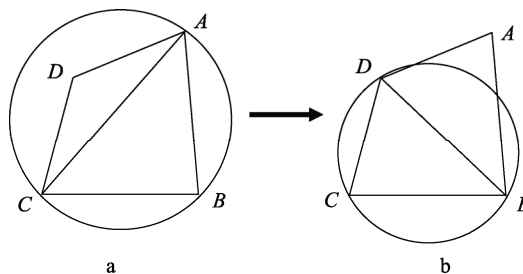


图1 第1准则的实例

Fig.1 Examples of the first criteria

2) 第 2 准则(最大化最小角准则)。在由三角剖分得到的三角网中, Delaunay 三角形的最小角度值大于其他三角网中的最小角度值。如图 2b 所示的三角形分割符合最小角最大准则,由此得到的是 Delaunay 三角形。

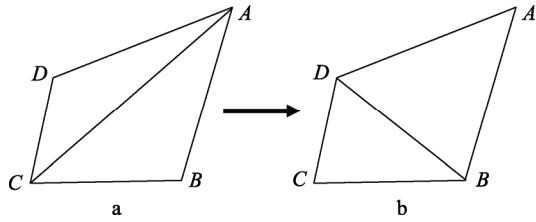


图 2 第 2 准则的实例

Fig.2 Examples of the second criteria

由 Delaunay 三角剖分所遵循的最大化最小角准则可知, Delaunay 三角网中狭长三角形出现的几率较小, 剖分得到的三角形形状规则且较为一致, 近似于等边三角形<sup>[13]</sup>。如果将网点集束放置在 Delaunay 三角形网格内, 则集束网点可以保持优良形状, 有利于图像阶调再现, 所以文中选择 Delaunay 三角网进行区域分割。

### 2.2.2 Delaunay 三角网的生成算法

根据 Delaunay 三角网的实现过程, 可以把生成 Delaunay 三角网的算法分成逐点插入算法、三角网生长算法和分治算法 3 类<sup>[14]</sup>。因为三角网生长算法简单, 占用内存空间较小, 所以选择三角网生长法来构造 Delaunay 三角网格。Green Sibson 在 1978 年首次提出三角网生长算法, Maus A, Brassel 等研究人员随后对算法进行了改进, 其基本流程如下所述<sup>[15-17]</sup>。

1) 为保证阈值矩阵在边界处的连续性, 文中在上、下、左、右 4 个方位分别把二维离散点集扩充了 5 个像素点, 图 3a 中正方形内的点为原始离散点, 正方形外的点为扩充之后的像素点。

2) 由于 Delaunay 三角剖分具有唯一性, 即对于给定的点集, 最终形成的 Delaunay 三角网格不会因建网时起始点位置的改变而变化, 所以可以选择二维离散点集  $A$  中任选一点作为初始点<sup>[18]</sup>。为方便起见, 文中根据种子点从左到右、从上到下的排列顺序选择第 1 个种子点作为初始点  $P_1$ 。然后在剩余点集中找到距离初始点最近的点  $P_2$ , 连接 2 点, 以线段  $P_1P_2$  作为 Delaunay 三角网格的初始基线。

3) 根据空外接圆准则和最大化最小角准则在初始基线的右侧区域找到第 3 点  $P_3$ , 连接  $P_1P_2$ ,  $P_2P_3$ ,  $P_3P_1$ , 即可得到第一个 Delaunay 三角形  $P_1P_2P_3$ 。

4) 分别将三角形的 3 条边  $P_1P_2$ ,  $P_2P_3$ ,  $P_3P_1$  作为基线, 根据第 3 步找到新的三角形的第 3 个顶点, 依次构造第 2 个、第 3 个、第 4 个 Delaunay 三角形。

5) 重复第 3、4 步, 直到离散点集合  $A$  中的所有点完成 Delaunay 三角网格的构建操作则结束循环。

Delaunay 三角网生成算法的构建过程见图 3。

### 2.3 确定三角网像素成员

在完成 Delaunay 三角网的构建之后, 每个离散点都会有自己所属的三角形区域 (见图 4)。若点  $P$

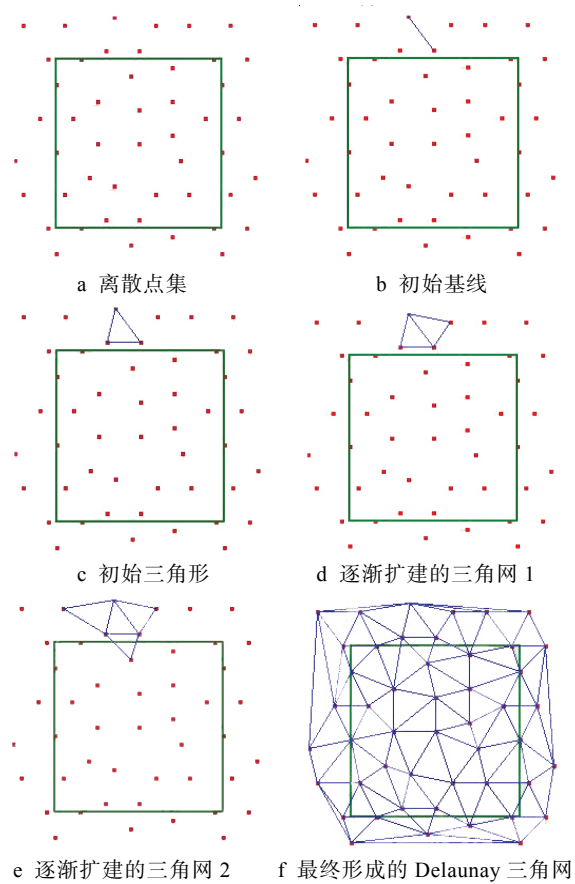


图 3 Delaunay 三角网的形成过程

Fig.3 Formation of the Delaunay triangulation network

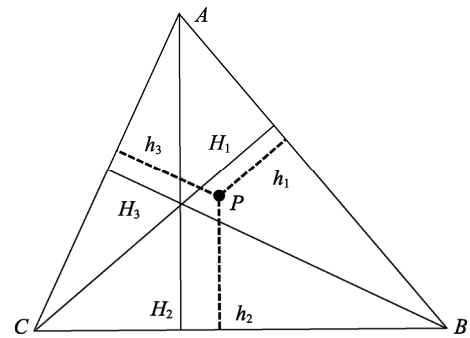


图 4 确定离散点的三角形区域

Fig.4 Triangular region that determines the discrete points

在三角形  $ABC$  内部, 则点  $P$  同时位于向量  $\vec{AB}$ ,  $\vec{BC}$ ,  $\vec{CA}$  的右侧, 文中借助此原理确定每个离散点所属的三角形区域。在确定像素点所属的三角形区域后, 计算每个三角形的 3 条高 (图 4 中的实线), 并分别计算像素点到三角形 3 条边的垂直距离  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  (图 4 中的虚线), 为后续的阈值计算做好准备。

### 2.4 计算阈值矩阵

利用式 (1) 计算阈值。

$$Q = a_1 \cos(2\pi(h_1 / H_1)^{1/2}) + a_2 \cos(2\pi(h_2 / H_2)^{1/2}) + a_3 \cos(2\pi(h_3 / H_3)^{1/2}) \quad (1)$$



式中:  $Q$  为阈值;  $H_1, H_2, H_3$  为三角形的 3 条高;  $h_1, h_2, h_3$  为像素点在高的方向上到三角形 3 条边的映射;  $a_i$  控制着网点在  $H_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 方向上的伸长率, 会对网点的形状产生一定的影响。  $\gamma_i$  直接决定着各网点之间的接触情况, 即网点之间的距离, 文中在进行实验时选择的参数是  $a_i=1, \gamma_i=1$  ( $i=1, 2, 3$ )。

由式 (1) 得到的阈值取值范围在  $-3 \sim 3$  之间, 而数字图像的像素灰度值的取值范围是  $0 \sim 255$ , 所以需要将阈值转换到  $0 \sim 255$  之间, 因此, 文中利用式 (2) 对阈值进行转换。

$$Q' = (Q - Q_{\min}) / (Q_{\max} - Q_{\min}) \times 255 \quad (2)$$

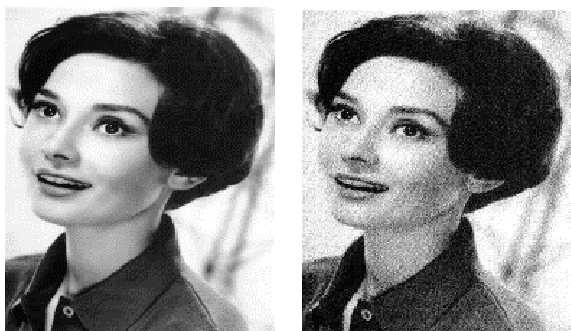
式中:  $Q'$  为转换后的阈值;  $Q_{\min}$  为  $Q$  中的最小阈值;  $Q_{\max}$  为  $Q$  中的最大阈值。

利用式 (2) 获得的阈值虽然已经满足像素灰度值的取值要求, 但此时的阈值并非整数, 并且在  $0 \sim 255$  范围内的分布是不均匀的, 如果按照此结果将连续调图像转化为半色调图像, 则会出现灰度级丢失的现象, 不能准确再现原始图像的阶调层次。为此, 文中将调整好的像素灰度值按照从小到大的顺序排序, 并记录下每个阈值所对应的大小排序号  $N$ , 如果阈值矩阵中共有  $T$  个不同的阈值, 则将 256 个灰度级平均分成  $T$  份, 然后根据每个阈值的大小标号进行赋值, 得到新的阈值  $Q''$ , 其中, INT 表示取整。

$$Q'' = \text{INT}(255 \times T/N) \quad (3)$$

## 2.5 数字图像二值化

把阈值矩阵按照从左到右、从上到下的顺序依次排列, 得到和原始图像相同大小的阈值矩阵, 然后将连续调图像的像素灰度值和相应位置的阈值进行比较, 若像素值小于阈值, 则将当前位置的像素值赋值为 0, 反之, 把像素值变为 255。在对每一个像素完成上述操作后, 即可得到半色调图像, 见图 5。



a 原始图像 b 文中算法得到的半色调图像

图 5 连续调图像和半色调图像

Fig.5 Continuous-tone image and halftone image

由随机中心聚集半色调算法和 Stucki 误差扩散滤波器得到的二值图像见图 6。从整体视觉效果看, 图 6b 比图 6a 更平顺, 但是由误差扩散算法得到的网点尺寸很小, 只有高分辨率的输出设备才能满足图像



a 文中算法

b Stucki 误差扩散滤波器

图 6 2 种数字半色调算法的输出结果

Fig.6 Output results of two digital halftone algorithms

再现的需求。文中采用的是聚集簇点, 网点尺寸大, 具有较小的周长面积比, 这不仅可以降低对复制设备的精度要求, 同时在输出打印时可以有效地避免“点增益”效应<sup>[4]</sup>。此外, 对比两图可以发现, 由 Stucki 误差扩散滤波器得到的半色调图像存在明显的规律性纹理和“蠕虫”现象, 该问题在实验图像的高光区域 (脸部区域) 尤为突出, 而由文中算法得到的图像并不存上述问题, 可以较为真实准确地再现原稿阶调。

## 3 结语

针对半色调图像存在规律性纹理的问题, 提出了随机中心聚集半色调算法。该算法通过构建 Delaunay 三角形网格, 根据像素点在三角形网格中的位置确定阈值, 并通过排序的方法对阈值矩阵内的阈值进行了调整, 以增加不同阈值的数量, 提高阈值在 256 个灰度级上的均匀度。实验结果表明, 采用文中算法得到的半色调图像不存在规律性纹理, 可以较好地再现原始图像的阶调层次。

## 参考文献:

- [1] ALLEBACH J, PAPPAS T. Digital Halftoning[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2003, 20(4): 12—13.
- [2] ALLEBACH J P. Selected Papers on Digital Halftoning[M]. Bellingham: SPIE Milestone Series, 1999.
- [3] 徐国梁, 谭庆平. 图像半色调化算法研究综述. 计算机工程与科学[J], 2012, 34(12): 87—97.  
XU Guo-liang, TAN Qing-ping. Survey of Research on Image Halftone Algorithm[J]. Computer Engineering & Science, 2012, 34(12): 87—97.
- [4] 姚海根, 程鹏飞. 数字半色调技术[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2013.  
YAO Hai-gen, CHENG Peng-fei. Digital Halftone Technology[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2013.
- [5] 张寒冰, 袁昕. 数字半色调技术中的误差扩散算法的研究[J]. 计算机应用, 2010, 30(4): 925—928.  
ZHANG Han-bing, YUAN Xin. Study on Error Diffusion Algorithm of Digital Halftoning[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(4): 925—928.

- [6] 徐国梁. 彩色印刷图像混合半色调化关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.  
XU Guo-liang. Research on Key Technology of Image Hybrid Halftoning for Color Printing[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [7] 冯伟. 多级半色调技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.  
FENG Wei. The Research of Multilevel Halftoning Technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [8] 王成林, 唐正宁, 高松. 基于 Am/ Fm 半色调的混合加网算法研究[J]. 包装工程, 2008, 29(3): 15—17.  
WANG Cheng-lin, TANG Zheng-ning, GAO Song. Hybrid Screening Based on AM/FM Halftoning[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(3): 15—17.
- [9] BERNAL A E A, WANG S G, LOCE R P. Parametrically Controlled Stochastically Seeded Clustered Halftones[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2012, 8292(1): 24.
- [10] 周正林, 田玉敏, 孟丽娜. 蓝噪声与绿噪声数字半调技术原理分析与比较[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(6): 54—56.  
ZHOU Zheng-lin, TIAN Yu-min, MENG Li-na. Analysis and Comparison of Blue- and Green-noise Digital Halftoning Methods[J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 41(6): 54—56.
- [11] 罗小华. Delaunay 三角剖分算法研究[D]. 广州: 暨南大学, 2011.  
LUO Xiao-hua. Research on Delaunay Triangulation Algorithm[D]. Guangzhou: Jinan University, 2011.
- [12] 袁小翠, 吴禄慎, 陈华伟. Delaunay 三角剖分算法改进与对比分析[J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(9): 163—166.  
YUAN Xiao-cui, WU Lu-shen, CHEN Hua-wei. Improvement and Comparative Analysis of Delaunay Triangulation Algorithm[J]. Computer Applications and Software, 2016, 33(9): 163—166.
- [13] 武晓波, 王世新, 肖春生. Delaunay 三角网的生成算法研究[J]. 测绘学报, 1999, 28(1): 28—35.  
WU Xiao-bo, WANG Shi-xin, XIAO Chun-sheng. A New Study of Delaunay Triangulation Creation[J]. Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica, 1999, 28(1): 28—35.
- [14] 余杰, 吕品, 郑昌文. Delaunay 三角网构建方法比较研究[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(8): 1158—1167.  
YU Jie, LYU Pin, ZHENG Chang-wen. A Comparative Research on Methods of Delaunay Triangulation[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(8): 1158—1167.
- [15] GREEN P J, SIBSON R. Computing Dirichlet Tessellations in the Plane[J]. Computer Journal, 1978, 21(2): 168—173.
- [16] MAUS A. Delaunay Triangulation and the Convex Hull of n, Points in Expected Linear Time[J]. Bit Numerical Mathematics, 1984, 24(2): 151—163.
- [17] BRASSEL K E, REIF D. A Procedure to Generate Thiessen Polygons[J]. Geographical Analysis, 1979, 11(3): 289—303.
- [18] 高莉. 改进的 Delaunay 三角剖分算法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.  
GAO Li. An Improved Delaunay Triangulation Algorithm[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiao Tong University, 2015.