

均衡集束网点密度的伪随机混合抖动 半色调化算法的研究

徐国梁^{1),2)} 谭庆平¹⁾

¹⁾(国防科学技术大学计算机学院 长沙 410073)

²⁾(湖南大学计算机与通信学院 长沙 410082)

摘 要 该研究发现,基于现有混合加网算法的阳集束网点和阴集束网点密度的比例大致是 1:2,而这样悬殊的比例将制约集束网点密度的提高.现有混合加网算法通过一个平面的几何划分形成集束网点.文中通过欧拉公式推导出了两个关于平面几何划分性质的定理.根据定理 2 提出的优化算法可以生成集束网点密度均衡的混合半色调化抖动矩阵.文中实验中用优化算法得到的半色调化抖动矩阵的阴阳集束网点的比例由优化前的 0.502195 提高到 0.903919.

关键词 半色调化;混合半色调化;抖动算法;抖动矩阵;Voronoi 图;Delaunay 三角化

中图法分类号 TP391 **DOI 号**: 10.3724/SP.J.1016.2009.01550

Research on Balancing Clustered Dot Density for Hybrid Halftone Dithering Algorithm

XU Guo-Liang^{1),2)} TAN Qing-Ping¹⁾

¹⁾(College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

²⁾(College of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082)

Abstract This study found that the ratio between the clustered dot density in shadow and high-light area is roughly 1:2, based on existing hybrid halftone algorithms. The ratio will bring unwanted constraint to increase clustered dot density. The hybrid halftone algorithms formed clustered dot with a geometric divide of a halftone plane. With the theorems deduced from Euler formula, a new algorithm to optimize the ratio is proposed. In the experiment to test the new algorithm, the ratio between clustered dot densities in shadow and highlight was improved to 0.903919 from original 0.502195.

Keywords halftone; hybrid halftone; dithering algorithm; dithering matrix; Voronoi diagram; Delaunay triangulation

1 引 言

计算机输出图像前需要根据输出设备的分辨率和深度转换光栅图像.光栅图像由像素点阵组成,每

个像素点用若干比特二进制信息表示该像素点的颜色或灰度,该二进制位数也称为图像的深度.当输出深度较大的图像到深度较低的图像设备上时,需要对图像做半色调化(halftone)处理.根据半色调化图像的特征,半色调化算法可分为调幅(AM)、调频

(FM)及调幅调频混合(AM/FM Hybrid) 3类算法. 如果使用了计算机产生的随机数,则算法也称为伪随机算法. 按计算过程的特点,半色调化算法又可分为点过程、相邻点过程和全局迭代过程3类. 抖动半色调化算法是一种点过程算法,用抖动半色调化算法计算一个连续调图像的半色调化图像的过程又称为加网.

本文第2节介绍本论文的研究背景;第3节对生成半色调化抖动矩阵的算法的几何性质做初步的分析,提出并证明用于构造均衡集束网点密度的抖动矩阵的定理;第4节提出一种新的可以平衡阴阳集束网点密度的构造抖动矩阵的算法;第5节对新算法的结果做分析讨论;第6节提出将来进一步的研究设想.

2 研究背景

AM半色调化算法将图像分割成大小相同的正方形单元,根据连续调图像的颜色,决定正方形单元中网点的大小(或网点单元中黑色像素点占的比例). 这样的正方形单元称为网点单元. 网点排列方向上单位长度内网点的个数称为加网的频率,网点单元排列的方向与Y轴的夹角为网角(参见图1). AM半色调化的网点排列的频率是不变的,点的大小变化以表示灰度大小. FM半色调化的网点大小固定,控制半色调化图像上网点的密度表达灰度值,因此称之为频率调制. FM半色调化网点的分布位置是随机分布的,因此FM半色调化有时也称为随机加网. 图2是一个等灰度值的连续调图像的FM半色调化后二值图像. FM技术的优点是:不产生Moiré,因而在印刷中四色叠加时不会产生玫瑰斑,图像的边缘平滑,使用FM加网的印刷品在扫描时也易于去网纹. 但FM半色调化图像的印刷生产质量依赖复制单个小点的能力,大多数印刷设备的能力达不到. AM-FM混合的半色调化的最主要的特

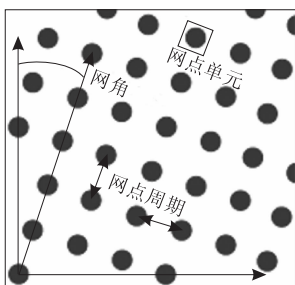


图 1

性是,当连续调图像的颜色变化时,半色调化网点的大小和点的频率都变化(参见图3). 它有可能结合AM和FM优点,既像FM半色调化一样不产生Moiré,同时对工艺的要求比FM半色调化低.

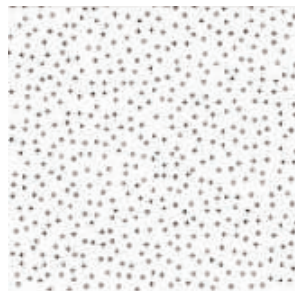


图 2

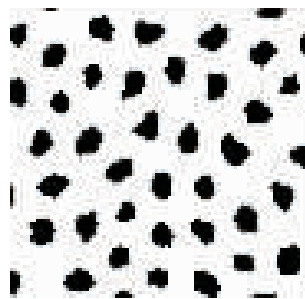


图 3

AM的频率规定在两个垂直方向上相邻网点之间的距离. 相邻网点间的距离是一个工艺上的约束条件. 加网的频率和网角是半色调化时由工艺条件决定的主要参数. 与AM不同,FM和AM/FM Hybrid半色调化中没有频率参数. 我们可以用集束网点密度(即单位面积上网点的个数)来限定网点间的平均间距. 集束网点密度的平方根是与AM加网的频率相当的参数. 如果混合加网的集束网点密度的平方根与AM加网的频率相等,混合半色调化和AM半色调化图像的网点的大小和网点之间的平均距离比较接近,因而在印刷中会有相近的工艺性质,这样就能在不改变现有生产工艺的条件下使用混合半色调化方法. 混合半色调化是用于胶印和柔印中最有前途的半色调化技术.

半色调化算法按计算过程可分为点过程、相邻点过程和全局计算过程3类^[1]. 点过程半色调化的速度比后两类算法快得多. PostScript对半色调化的控制采用的是点过程抖动机制^[2]. 现代印刷制版的工艺流程和设备大都将PostScript版面描述语言作为标准的界面. 大规模的工业应用,如彩色喷绘、激光打印机和印刷制版都广泛使用点过程抖动半色调化算法.

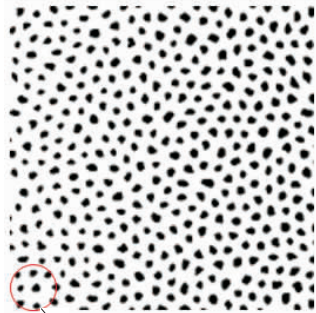
实现抖动算法首先要构造抖动矩阵. 抖动矩阵构造方法有两类: 直接法和间接法. 直接法, 用已有半色调化算法构造或随机点方法逐级构造网点的特性函数^[3-5]. 间接法, 先用计算几何的方法生成集束点分布的区域, 然后再生成区域内集束网点的形状^[6-7]. 集束网点就是半色调化图像中在一个网点区域内具有相同值(0 或 1)的像素点的集合. 另外我们还将网点区域内, 数量占少数(即少于 50%)的像素点的集合称为少数点集束. 如果少数点集束的像素点值为 1 我们称之为阳图点, 否则为阴图点.

文献[5]使用间接法做混合半色调化, 它把半色调化看作是一个空间点的随机过程, 用空间点统计方法的点对关系函数(pair relation)可以刻画随机点分布的概率, 该方法对网点的形状没有很强的控制, 在从高光点到暗调点过渡的中间调的半色调化图中会出现类似蠕虫形状的图案(参见图 4, 摘自文献[5]). 这样的形状对控制网点扩大不利而且视觉上不美观. 这是文献[5]方法的一个重大缺陷. 直接法可以直接控制集束点的形状, 使半色调化图像在印刷中保持良好的工艺特性. 优良的网点形状可以减小印刷工艺过程中的网点扩大.



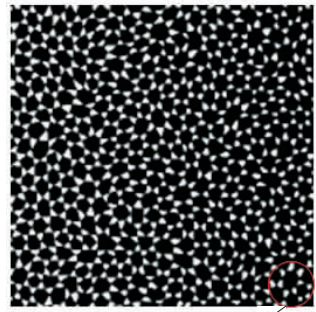
图 4

印刷生产一般要求 2% 的阳图点不丢失, 98% 的阴图点不完全糊死. 这要求半色调化图像的 2% 的集束网点的直径不小于最小可复制网点的直径以及网点之间的距离必须大于印刷工艺的要求. 这也决定了集束网点密度的上限. 因为集束点密度越高, 如同 AM 的高加网频率, 使印刷图像的细腻程度和文字、图形边缘轮廓质量就越好, 所以在满足前面所说的限制的前提下, 集束网点密度越大越好. 文献[6-7]的方法产生的半色调化网点的阴图点密度和阳图点密度相差悬殊(参见图 5、图 6, 由文献[6]中的图 5(a)的局部放大), 这严重地制约了印刷图像半色调化集束点的密度的提高. 所以减小阴阳集束网点密度的差别, 即构造阴阳集束网点密度平衡的抖动矩阵是提高混合加网的质量和印刷适性的重要技术.



7个集束网点

图 5



13个集束网点

图 6

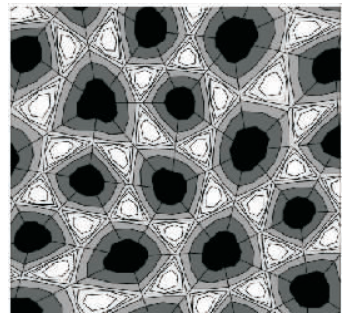


图 7

3 半色调化算法的几何分析

3.1 半色调化图像的对称性分析

平网的半色调化图像在 0% 的灰度(全白)到 100% 的灰度(全实地)之间的变化最理想的情况是按 50% 灰度为界限呈现“对称”的性质. 半色调化图像需要对称性的原因是:

(1) 印刷需要做全阶调的图像复制, 高光或暗调区域的网点形状都要优化;

(2) 典型的印刷工艺有阴阳图之间多次转换. 如, 输出胶片使用阳图, 从胶片转移到 PS 版后, PS 版上是阴图, 用 PS 版印刷时, 承印物(如纸张)的图像又是阳图. 所以阴阳半色调化图最好有一致的

特性.

印刷上最常用的 AM 加网的点形,如 Euclidean 网点,其网点形状具有很好的对称性. Euclidean 网点的网点特性函数按 0.5 灰度值为中心在区间 $[0,1]$ 上是反对称的.图 8 是一个用 Euclidean 网点加网的全阶调的渐变网.渐变网可以全面地反映所用网点的性质.在图 8 渐变的网点单元中,我们可以看到网点形状从小到大的一个生长过程,这个生长过程还必须服从堆栈限制,否则在半色调化中就会有不平顺的缺陷^[1].图 9~图 13 是放大的 4 个网点单

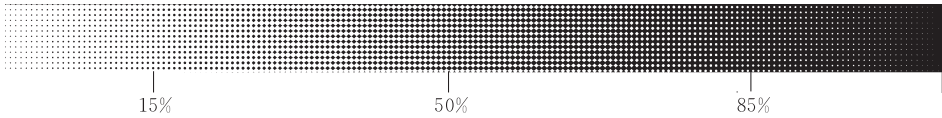


图 8

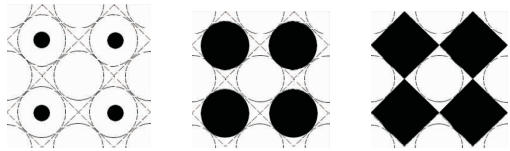


图 9

图 10

图 11

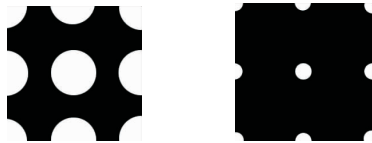


图 12

图 13

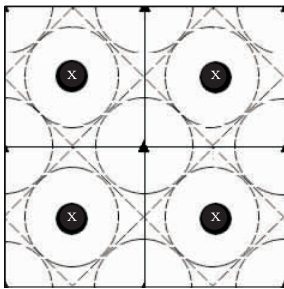


图 14

3.2 混合半色调化的集束点分布与 Voronoi 多边形

AM/FM 混合半色调化一般可以分为两个过程.首先由顶级过程生成集束网点的中心,次级过程从集束网点中心出发生成集束网点.如果首先生成集束网点的中心,每个中心像素点的值为 1,其它像素点都为 0.这个半色调化图就是由中心点位置决定的非空白的初始灰度(半色调化算法能表达的最小灰度)的平网图.为了考察上述随机生成的网点分布在一定的距离上观察能否产生均匀的视觉效果,我们可以对图像中心点做傅立叶变换来判断中心的分布是否均匀.

元从小到大的按堆栈限制生长的过程. Euclidean 网点生长的规律是将半色调化图像按 AM 加网的频率划分成正方形的网点单元.正方形的中心是阳图网点的中心,正方形的顶点是阴图网的中心.图 14 是 4 个 Euclidean 的网点单元,每个网点单元是 $N \times N$ 像素组成的正方形, X 是正方形的中心,也是网点生长的起点,是阳图网的中心. \blacktriangle 是正方形的顶点,是阴图网的中心.从中可以看出,阳图点和阴图点的形状是“对称”的.

以集束网点的中心点集合计算 Voronoi 图.如果在半色调化图像平面上,每个集束网点的中心点放置一个像素值为“1”的点,其它位置都为“0”,则面积小的 Voronoi 区域相对密度高,面积大的区域相对密度低.因此我们上述最低灰度值的平网图发生生成灰度较高的平网时,集束点大小需要与所在 Voronoi 区域的面积成正比,这样才符合平网密度均匀性的要求(参见图 7).

图像半色调化的等效变换原则要求平网的半色调化图像网点分布是均匀的. Voronoi 区域的顶点是离中心点最远的位置,因此如果按堆栈限制生成的网点,半色调化图像中顶点位置的像素值是最接近实地(灰度值为 1.0)时才变为黑色.因此, Voronoi 区域的顶点就必然形成阴集束网点的中心.这样的生成半色调化网点的方法对于半色调化图案的视觉上的均匀性是有利的,但也使阳图点和阴图点密度不一致.接下来我们会进一步分析文献[6-7]构造的半色调化矩阵阴阳集束网点密度不一致的原因.

3.3 均衡集束网点密度定理

文献[6-7]生成的半色调化抖动矩阵是一个可以无缝拼接的单元.因此我们只要考察一个抖动矩阵单元中对应的阴阳集束网点密度的比例就可以知道任意大小拼接时阴阳集束网点密度的比例.因为生成的中心点能无缝拼接,所以由抖动矩阵单元中心点生成的 Voronoi 图可以通过拓扑变换成一个封闭的三维体,而且没有空洞,其特性数为 2. 设 F 是面的个数,也就是 Voronoi 区域的个数. Voronoi 区域与中心点是一一对应的,因此 F 也等于中心点的个数 n . V 是顶点数, E 是边数.

如果将 Voronoi 的每一条边相邻的两个区域的中心点连接起来,就得到平面的 Delaunay 三角划分^[8],它是 Voronoi 的对偶图.为了方便推导下面两个有关集束网点密度性质的定理我们使用 Delaunay 三角划分来分析.要注意与我们讨论 Voronoi 图的情形不同的是,Delaunay 三角划分中三角形的顶点将作为阳集束网点的中心,三角形的外心作为阴集束网点的中心.

通过欧拉公式可以推导两个关于使阴阳集束网点密度平衡的几何划分性质的定理.一个抖动矩阵单元阴集束网点的数量是几何划分顶点的个数,阳集束网点的个数是几何划分中面的个数.因此阴阳集束网点平衡就是使顶点数(V)和面数(F)尽可能接近.

定理 1. 假设 G 是一个可以无缝拼接的三角形划分.顶点、边和区域的个数分别是 V 、 E 和 F ,则 $F=V/2+2$.

证明. 因为 G 是可以无缝拼接的几何划分,所以它可以看成是一个没有空洞的多面体.所以可以对 G 应用欧拉公式:

$$V-E+F=2 \quad (1)$$

每一个三角形有三条边计一次得 $3F$,因每一条边被两个三角形共享,所以每条边计了两次,

$$3F=2E \quad (2)$$

将方程(1)中的 E 用等式 $E=(3/2)F$ 代入得 $V-(3F/2)+F=2$,

$$V=F/2+2 \quad (3)$$

证毕.

用于构造抖动矩阵的几何划分通常有超过 1000 个的区域.将方程(3)的两边同时除以 F 得 $V:F \approx 1:2$.即同一区域中阴集束点的个数(F)几乎是阳集束点个数(V)的一倍.这与我们在第 2 节的观察一致.

定理 2. 设一个封闭的没有空洞的多面体的顶点数、边数和面数分别是 V 、 E 和 F ,如果所有的面都是四边形,则 $F=V-2$.

证明. 因为 G 是可以无缝拼接的几何划分,所以它可以看成是一个没有空洞的多面体.所以可以对 G 应用欧拉公式:

$$V-E+F=2 \quad (4)$$

如果所有的网点区域都是四边形组成,每一个四边形对应四条边,边被计数 $4F$ 次,所有的边与两个四边形相邻,所以每一条边都被计数两次.由此可得

$$4F=2E.$$

将式(4)中的 E 用 $2F$ 代入得

$$F=V-2. \quad \text{证毕.}$$

从定理 2 可以得知,如果所有的网点区域都是四边形组成,我们就可以构造集束点密度均衡的抖动矩阵.用来生成 Euclidean 网点的几何分割就是一个这样的特例,它全部由正方形组成.所以本文优化方法的基本思想是从 Delaunay 三角形划分出发,尽可能多地将三角形合并生成全四边形划分或四边形占优的几何划分.由这样的几何划分生成的抖动矩阵可以最大限度地平衡半色调化图像中的阴阳集束网点的密度.

4 均衡集束网点密度的伪随机抖动数组构造

4.1 中心点的构造

Error Diffusion 生成的 Mask 很难做到周期性重复时可无缝拼接^[9],因此 Error Diffusion 生成的抖动矩阵做半色调化时可以看到抖动矩阵拼接的周期性痕迹.而通过算法 1~3 产生的抖动矩阵,可以比较容易控制满足一定条件的周期性的重复的无缝拼接.在研究中我们采用了和文献[6-7]类似的方法通过计算机产生的伪随机数生成中心点位置.通过随机的空间填充曲线,将计算机产生的伪随机数的一维的随机分布特性转变成在二维的格点空间的分布均衡的随机分布特性.另外通过取模运算使中心点分布满足无缝拼接要求.

算法 1. 生成随机空间填充曲线的算法.

1. 初始化空间填充曲线为行扫描曲线,即
 - 1.1. $Curve[I, J].x = J$;
 - 1.2. $Curve[I, J].y = I$;
2. $K=0$;
3. $Loops = 30 \times M \times N$;
4. While ($K < Loops$) do
 - 4.1. 用 $rand()$ 函数产生 4 个随机数 x_1, y_1, x_2, y_2 ;
 - 4.2. 对随机数取模得到两对点坐标
 - 4.2.1. $J1 = x_1 \bmod M$;
 - 4.2.2. $I1 = y_1 \bmod N$;
 - 4.2.3. $J2 = x_2 \bmod M$;
 - 4.2.4. $I2 = y_2 \bmod N$;
 - 4.3. 空间曲线坐标交换
 - 4.3.1. $Temp = Curve[I1, J1].x$;
 - 4.3.2. $Curve[I1, J1].x = Curve[I2, J2].x$;
 - 4.3.3. $Curve[I2, J2].x = Temp$;

- 4. 3. 4. $Temp = Curve [I1, J1].y;$
- 4. 3. 5. $Curve [I1, J1].y = Curve [I2, J2].y;$
- 4. 3. 6. $Curve [I2, J2].y = temp;$
- 4. 4. $K = K + 1;$

5. 结束.

算法 2. 生成中心点分布单元图的算法.

1. 用算法 1 生成随机空间填充曲线;
2. 将单元图所有的像素初始化为 0;
3. $I = 0;$
4. While ($I < M \times N$) do
 4. 1. 取空间填充曲线的第 I 个点的 x 和 y 坐标, 如果该点像素值为 0, 则将该点当作中心点, 并且将像值设置为 128;
 4. 2. 以点 (x, y) 为圆心, 做半径为 r 的圆, 将圆覆盖范围内的所有点做取模运算, 即对于负坐标点将坐标值加 W 或 H , 对于超出 W 和 H 范围的坐标将坐标值减 W 或 H . 并取模后的点的像素值与 1 做“or”位操作;
 4. 3. $I = I + 1;$
5. 将所有像素值为 1 的点修改成 0, 就得到了中心点的图像.

为了使用抖动矩阵生成的半色调化图像与用常规网点生成的半色调化图像在印刷制版中有接近的工艺特性, 一个显而易见的要求是前者的集束网点的密度平方根与后者的频率相同. 这样网点的平均大小和网点之间的间距也比较接近. 常用的 AM 加网的频率是 175LPI. 2400DPI 的激光照排机上以 175LPI 频率加网时, 相邻点的中心距在网点排列的方向上为 13.7, 在对角线上为 19.4. 所以我们生成伪随机的 1024×1024 抖动矩阵时, 我们首先试用 Radius 参数为 14. 根据文献[6]生成中心点的算法, 生成的中心点最小间距为 14, 最大为 28. 根据算法 1 和算法 2 开发的程序运行的结果, 生成的中心点的个数是 3657. 一个网点单元所占平均的面积是 287 个像素点, 在 2400DPI 的分辨率下相当于 142LPI. 为了得到和 175LPI 相当的集束点的密度, 最小的网点间距 Radius 要变小. 表 1 就是我们通过实验得到的常见的激光照排机的分辨率和生成中心点参数表. 其中, Width 和 Height 是生成中心分布的水平垂直栅格数, Radius 是算法中使用的圆盘半径参数, LPI 是与中心点密度相当的 AM 加网的频率.

表 1 中心点分布参数表

	Width	Height	Radius	Centers	LPI
2400DPI	1024	1024	11	5892	180
3048DPI	1024	1024	14	3657	180
3600DPI	1024	1024	16	2800	186

4.2 生成 Voronoi 图和 Delaunay 三角划分

首先我们通过计算几何的算法得到以中心点为点集的 Voronoi 图, 将任意两个相邻的 Voronoi 区域的中心点连接起来就得到像素点平面的 Delaunay 三角形划分. 文献[8]介绍的 Fortune 算法是已知的求 Voronoi 图最优的算法.

前面我们生成的中心点的分布图在水平和垂直的方向上都是周期性地重复且无缝拼接的, 我们称之为基本单元. 根据 Voronoi 图的定义, Voronoi 图和中心点的分布有同样的周期性. 如果我们用 4 个基本单元图拼接成一个 2048×2048 的中心点的图像, 并求 Voronoi 图, 就可以从中截取一个 1024×1024 大小的可无缝拼接的 Voronoi 图. 实际上只要在水平方向和垂直方向上重复 256 格点坐标中心点图就足以得到周期性的 Voronoi 图单元 (参见图 15), 而且可以减少中心点的个数, 加快计算速度. 由这种方式得到的中心点集称为扩展点集, 其中基本单元的坐标范围是 $[0..1023, 0..1023]$.

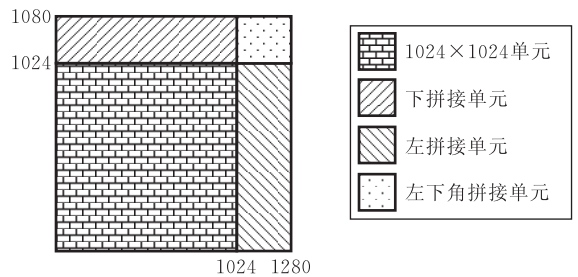


图 15

4.3 几何划分优化算法

几何划分的每一个区域限定了一个集束网点生长的空间. 为了保持网点优良形状, 几何划分的区域要避免狭长的形状, 这与 Delaunay 三角划分的原始定义是类似的. 根据定理 2 和保持网点形状的要求, 本文提出的几何划分优化的目标是: 尽可能多地将三角形合并成四边形, 且尽量避免四边形狭长的形状, 维持优化后几何划分单元的无缝拼接性质.

为了在合并三角形时, 考虑形状的因素, 我们将三角形合并的质量因子定义如下:

设 A_1, A_2, A_3, A_4 是将公共边 $A_2 A_3$ 两边的三角形合并后形成的四边形的 4 个顶角. 首先将 4 个顶角按下列公式转换成锐角.

$$A'_i = \begin{cases} A_i, & A_i \leq 90 \\ 180 - A_i, & 180 > A_i > 90 \\ 0, & A_i \geq 180 \end{cases} \quad (5)$$

将 4 个角按升序排列成角度的四元组 $(A'_i,$

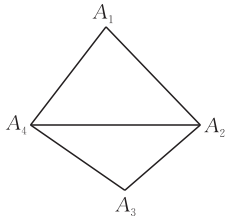


图 16

$A'_{i_2}, A'_{i_3}, A'_{i_4}$), 其中 $i_1, i_2, i_3, i_4 \in \{1, 2, 3, 4\}, A'_{i_1} \leq A'_{i_2} \leq A'_{i_3} \leq A'_{i_4}$. 该四元组称为以 A_2A_4 为公共边的两个三角形或边 A_2A_4 质量因子. 做三角形合并优化时, 将候选的合并对象按质量因子排队, 优先合并质量因子大的边两边的三角形. 避免合并形成的四边形出现狭长的形状, 这是保持集束网点优良形状的需要.

在三角形的合并优化过程中, 会有一部分三角形无法合并成为孤立三角形. 为了减少孤立三角形

的出现, 在合并过程中要按下面的方法动态更新扩展边的质量因子, 将只有唯一的合并可能的边的质量因子设置为最大值, 作为优先合并的选择.

扩展边的质量因子更新.

我们以扩展边 A_2A_4 为例说明更新方法. 首先我们定义扩展边是用来合并改变两边的三角形, 以得到一个四边形单元. 因为只有当一条边是“new”状态时, 其相邻的两个三角形都是“new”状态. 否则, 至少有一个三角形是“used”状态, 因此不用再考虑基于该边的三角形合并. 假设我们需要计算扩展边 A_2A_4 的质量因子, A_2A_4 必须是标记为“new”的边. 其它相关的四条边组合起来有以下 16 种情况, 在图 17(g)、(h) 和 (l)~(p) 的情形下, 如果三角形不合并, 将形成孤立的三角形. 为了避免这种情况出现, 将质量因子设定为 $(+\infty, +\infty, +\infty, +\infty)$.

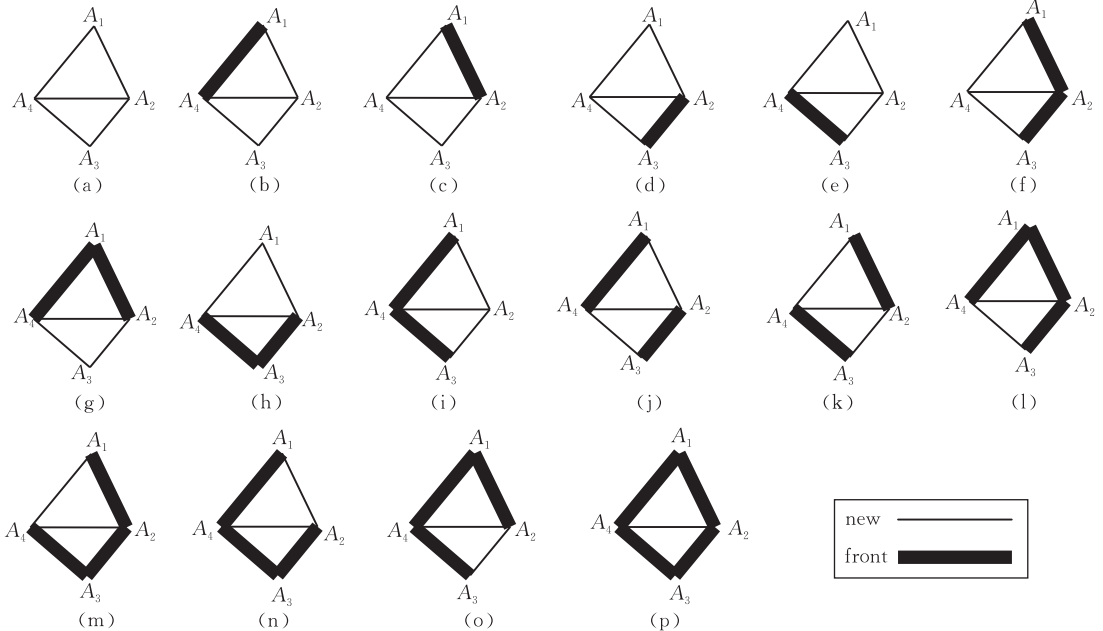


图 17

从任意一个点出发用宽度优先法遍历所有的三角形, 并完成三角形的合并优化, 为了使合并后几何划分可以无缝拼接, 在将与同一条相邻的两个三角形合并时, 如果关于基本单元对称位置的边在现有的几何划分中, 则也要将它们相邻的三角形合并.

算法 3. 几何划分优化算法.

1. 初始化;
2. 任意选择一个三角形一个顶点作为第一级顶点, 放入结点表; 将连接该顶点的所有的边标记为“front”等待处理的边;
3. While(结点表非空)
 - 3.1. 从结点表中取一个级数最低的结点扩展, 将所

有标记为“new”与该结点相连的边和相对的边放入扩展边表;

- 3.2. 将扩展边的另一个顶点不在结点表中, 则将该结点的级数加 1 并放进结点表;
- 3.3. 根据前面质量因子定义, 计算每一条扩展边的质量因子;
- 3.4. 选择质量因子为最大值的边及其对称边合并相邻的两个三角形. 将三角形和扩展边标记为“used”, 三角形的其它边如果标记为“new”就修改为“front”, 如果是“front”就修改为“used”; 关于基本单元对称的边定义为, 如果一条边的坐标为 $((x_1, y_1), (x_2, y_2))$, 基本单元的大小为 (M, N) , 则边 $((x_1 + M, y_1), (x_2 + M, y_2))$,

$((x_1, y_1 + N), (x_2 + M, y_2 + N)), ((x_1, y_1 + N), (x_2 + M, y_2 + N)), ((x_1 - M, y_1), (x_2 - M, y_2)), ((x_1, y_1 - N), (x_2 + M, y_2 - N)), ((x_1, y_1 - N), (x_2 - M, y_2 - N)), ((x_1 + M, y_1 - N), (x_2 + M, y_2 - N)), ((x_1 - M, y_1 + N), (x_2 - M, y_2 + N))$ 就是关于基本单元对称的边;

- 3.5. 更新每一条扩展边的质量因子;
- 3.6. 如果扩展表非空转步 3.4, 否则转步 3;
4. 结束.

4.4 构造抖动矩阵

优化后的几何划分由四边形和三角形组成. 对四边形, 以合并得到的四边形的各边的中点连接成一个四边形, 以四边形的重心点为中心做从 1.0 至 0.5 的渐变填充. 对三角形, 以各边的中心点连接成一个三角形向三角形的重心点做从 1.0 至 0.5 的渐变填充. 以半色调化图上集束网点通常在水平和垂直方向上的像素点数为 10~20 个. 所以我们用 PostScript 语言描述渐变填充, 在我们的实验中使用 30 级是足够的, 完全可以适用现有印刷制版设备从 1000DPI 到 5000DPI 的图像输出分辨率. 我们将顶点到各边中点及三角形与四边形的重心点到各边中点的线段分成 30 段, 将分割点按顺时针方向连接起来形成路径, 并对该路径包围的区域做相应灰度级的填充. 我们用 PostScript 语言描述渐变图形的填充, 通过 PostScript 的 scale 命令就可很方便地对图形做缩放, 这样就可以很容易生成不同分辨率下多种集束网点密度的抖动矩阵. 再用光栅图像处理器(RIP)生成抖动矩阵图像.

这样由灰度渐变多边形区域组成的灰度图像在多边形的顶点处都是尖角, 用这样的抖动数组形成的集束网点也将呈现尖角的形状. 为了使生成的集束网点光滑柔和, 我们将抖动矩阵图像在 Photo-Shop 中做高斯滤波做平滑处理, 幅度 300%, 范围 4 个像素点.

5 实验和讨论

(1) 阴阳集束点的密度的比例

表 2 反映三角形合并优化前后的几何划分统计指标变化的对比. 其内容包括边数、顶点数、顶点的平均度数、面数以及顶点数/面数. 顶点和面的个数决定阴阳图点的个数, 边数与渐变填充的计算复杂度有关, 但计算是一次性的, 应该以追求高质量为先. 顶点数/面数反映用几何划分生成阴阳集束点的

密度的比例.

表 2 三角形合并前后几何划分参数对比表

	边数	顶点数	顶点平均度数	面数	顶点数/面数
合并前	8554	2860	5.981818	5695	0.502195
合并后	5437	2860	4.174825	3164	0.903919

从表 2 可以看出, 进行三角形合并优化后, 顶点数/面数从 0.502195 优化成了 0.903919. 这说明用优化后几何划分生成的抖动矩阵, 其阴阳集束点的密度的比例是 0.903919, 基本达到平衡. 这与理想的 1.0 比例值还有一定的差距. 因为三角形的分布和邻接方式会使一部分三角形成为孤立的三角形, 所以不能将所有的三角形都合并成四边形. 只要有孤立的三角形存在就不能达到 1.0 比例. 虽然在三角形的内部增加一个点可以使 1 个三角形变成 3 个四边形, 减少孤立三角形, 但增加的点会改变集束点中心点分布的空间的均匀性, 因而简单地增加点的方法不合理.

(2) 无缝拼接

根据本文第 2 节的抖动半色调化算法对大于抖动矩阵的图像半色调化时, 抖动矩阵要拼接. 如果抖动矩阵边缘的集束网点可以无缝拼接, 则半色调化图像也能表现无缝拼接的特性. 本文采用的中心点生成算法和三角形合并算法, 都考虑了无缝拼接的要求. 所有由此算法生成的几何划分也是对称的, 从几何划分到抖动矩阵也是对称, 因而可以无缝拼接. 图 18 是实验生成的抖动矩阵的拼接图样, 旁边的直线标注的是拼接的位置, 显然, 由本文方法得到的抖动矩阵是可以无缝拼接的.

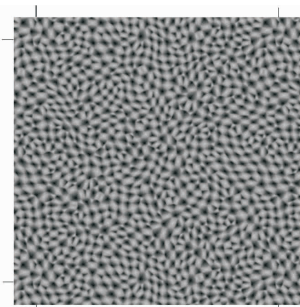


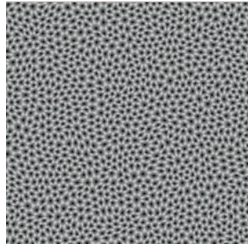
图 18

(3) 图样

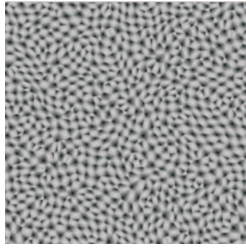
为了考察使用优化算法对抖动矩阵均匀性的影响, 我们将没有优化的几何划分生成的抖动矩阵和优化后的几何划分生成的抖动矩阵用 Matlab 计算它们做傅立叶变换后的功率谱. 图 19(b)和(d)都没有明显的能量集中的频率点, 这说明这两个抖动矩

阵图像都是个向同性的而且优化对抖动矩阵的均匀性没有影响。

另外我们将抖动矩阵作为一个新的网点函数加入 Harlequin RIP,并用该 RIP 解释了一个渐变色



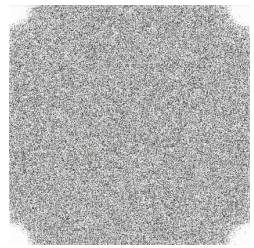
(a) 优化前抖动矩阵



(b) 优化后抖动矩阵



(c) 优化前抖动矩阵功率谱



(d) 优化后抖动矩阵功率谱

图 19



图 20



图 21

6 结束语

本文构造半色调化抖动矩阵方法的核心是三角形合并优化算法(算法 3). 该算法兼顾了两个目标, 合并四边形的形状和合并三角形的个数. 合并四边形的形状是用合并四边形的质量因子来限制的, 在合并操作的前沿边中比较优先合并可能被孤立的三角形是为了增加合并三角形的个数. 该方法使阴阳集束点密度的比例从 1:2 优化到了 1:1.1063. 本文的算法是在扩展边列表中做的局部优化选择, 如果能做全局优化的选择, 则有可能得到更好的结果. 另外, 在保证中心点均匀分布的前提下, 如果有选择地在孤立三角形中插入中心点, 则还有可能进一步减少孤立三角形的数量, 改善阴阳集束点的密度的比例.

参 考 文 献

[1] Wu C W, Gerhard T, Mikel S. A unified framework for digital

条图 20 和一个人物图像图 21. RIP 输出的半色调化图像分辨率为 3600DPI, 集束网点密度与 175LPI 的加网线数相当.

halftoning and dither mask construction; Variations on a theme and implementation issues. Yorktown Heights, New York, USA; IBM Research Division, IBM Research Report: RC22849(W0305-137), 2003

- [2] Adobe Systems Incorporated. PostScript Reference Manual, 3rd Edition. Reading, MA, USA; Addison-Wesley Publishing Company, 1999
- [3] Adler R L, Kitchens B P, Martens M, Tresser C P, Wu C W. The mathematics of halftoning. IBM Journal of Research and Development, 2003, 47(1): 5-14
- [4] Allebach J P, Liu B. Analysis of halftone dot profile and aliasing in the discrete binary representation of images. Journal of Optical Society of America, 1977, 67(9): 1147-1154
- [5] Daniel L L. Modern digital halftoning[Ph. D. dissertation]. Newark, Delaware, USA; University of Delaware, 1999
- [6] Ostromoukhov V, Hersch R D. Stochastic clustered-dot dithering. Journal of Electronic Imaging, 1999, 8(4): 439-445
- [7] Tu Chang-He, Pan Rong-Jiang, Meng Xiang-Xu. An algorithm for building stochastic clustered-dot screens. Chinese Journal of Computers, 2000, 23(9): 931-937(in Chinese)
(屠长河, 潘荣江, 孟翔旭. 一种随机聚合网屏的生成方法. 计算机学报, 2000, 23(9): 931-937)
- [8] de Berg M, van Krefeld M, Overmars M, Schwarzkopf O. Computational Geometry: Algorithms and Applications, 2nd Edition. New York, USA; Springer, 2000
(de Berg M 等著, 邓俊辉译. 计算几何-算法与应用. 北京: 清华大学出版社, 2005)
- [9] Ancin H, Bhattacharjya A K, Shu J. A new void-and-cluster method for improved halftone uniformity. Journal of Electronic Imaging, 1999, 8(1): 104-111



XU Guo-Liang, born in 1964, Ph. D. candidate, associate professor. His research interests include graphics, image processing and its application in printing industry.

TAN Qing-Ping, born in 1965, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. His research interests include theory of software engineering and high confidence software technology.

Background

Hybrid dithering algorithm, as a halftone method, is most promising for printing industry. After analyzing existing algorithms to produce hybrid halftone dithering matrix with a geometric divide, this paper found that clustered dot density in shadow and highlight area had big differences. This will bring unwanted constraint to increase clustered dot density. The hybrid halftone dithering matrix is usually constructed from a 2D geometric divide, such as Voronoi diagram, where the centre of each area of the divide is randomly and uniformly distributed across the halftone plane. The vertex of the Voronoi region will be the centre of shadow clustered dot and center point of the region will be the centre of light clustered dot. The ratio between the number of vertex and area is approximately 2:1 when Voronoi diagram is used as the geometric divide, which is shown by theorem 1 of this paper.

As theorem 2 of this paper indicates, the clustered dot density in shadow equals to the clustered density in light if the geometric divide used to produce the dithering matrix is composed of quadrilaterals only. Therefore, to merge triangles of Delaunay triangulation as much as possible is the objectives of our optimizing algorithm while keeping the resulting geometric divide could be tiled seamlessly. The algo-

rithm to construct clustered dot dithering array follows 6 steps: (1) generate a uniformly distributed and seamless connected clustered dot centre; (2) make a 2D point set by extending the boundary seamlessly; (3) calculate Voronoi region from the point set above; (4) connect all the center of the region sharing the same edge as boundary in order to obtain a Delaunay divide; (5) merge the triangle to optimize the geometric divide to make the dithering array; (6) produce the dithering array with the geometry divide above and smooth the clustered do shape with Gaussian filter. In experiment to test the new algorithm, the ratio between clustered dot densities in shadow and highlight is improved to 0.903919 from original 0.502195.

The authors have been engaged in research and development of halftone products for printing industry since 1997 and was financially supported by Science and Technology Bureau, Hunan Province in 2005 under contract 05GK3023. The objective of this research is to develop quality halftone method for current printing process. The halftone product ESK (Engraving Screening Kits) has been used in more than 70 engraving plate making factories in China and other Asian countries.