

基于等高线均匀分割的色彩谐和准规则斑图生成方法

胡天鸿

(浙江理工大学信息学院, 浙江 杭州 310018)

✉545242744@qq.com



摘要: 针对传统生成方法导致准规则斑图不具有美感的问题, 从图形结构及色彩层面提出一种提升准规则斑图美感的方法。首先, 为减少“窄色带”分布, 以等高线分割区间内像素数的方差最小化为目标, 优化出一种合理的等高线分割方式。其次, 通过映射函数将等高线分割区间的色彩定义在色彩谐和模板的扇区范围内, 最终生成富有美感的准规则斑图。实验结果表明, 该方法能够生成结构协调的图形, 且在用户研究中的指标评分也比传统方法提高了近1倍, 使准规则斑图能够更好地应用于花型设计。

关键词: 准规则斑图; 图形结构及色彩; 色彩谐和模板

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

A Method of Generating Color Harmonious Quasi-regular Pattern based on Uniform Segmentation of Contours

HU Tianhong

(School of Information Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

✉545242744@qq.com

Abstract: Aiming at the problem that the quasi-regular pattern is not aesthetically pleasing due to the traditional generation method, this paper proposes a method to improve the aesthetics of the quasi-regular pattern from the aspect of graphic structure and color. First, in order to reduce the "narrow color band" distribution, a reasonable contour segmentation method is optimized with the goal of minimizing the variance of the pixel number in the contour segment interval. Secondly, the color of the contour segmented interval is defined within the sector range of the color harmony template through the mapping function, and finally an aesthetic quasi-regular pattern is generated. Experimental results show that the proposed method can generate well-structured graphics, and the index score in user research is nearly doubled compared with the traditional method, which makes the quasi-regular pattern better applied to flower pattern design.

Keywords: quasi-regular pattern; graphic structure and color; color harmony template

1 引言(Introduction)

准规则斑图^[1-2]是指基于弱混沌理论, 通过对均匀随机网进行哈密顿量变换及平滑操作导出数学模型后生成的一类非线性图形。准规则斑图在造型结构上具有较强的对称性与规则性, 在色彩上五彩斑斓、绚丽多姿, 因而被广泛应用于纺织品与服饰品的花型设计中。

由于准规则斑图是基于等高线任意分割与色彩随机赋值

方法生成的, 图形在结构及色彩上不具有美感, 无法直接满足设计需求。近年来, 关于准规则斑图的研究主要集中于纺织品设计领域, 它们均是通过变换数学模型及参数来实现图案花型的变化, 而关于如何生成具有美感的准规则斑图的研究鲜有报道。

本文针对传统的准规则斑图生成方法导致图案不具有美感的问题, 从图形结构及色彩层面, 提出一种提升准规则斑

图美感的方法。首先以各分割区间内方差最小化为目标，优化出一种合理的等高线分割方式，使各分割区间内像素数均匀；其次基于色彩谱和模板，通过映射函数将等高线分割区间的色彩限制在谱和模板的扇区范围内，最终生成结构协调及色彩谱和的准规则斑图。

2 相关工作(Related work)

近年来，已出现了较多的准规则斑图在纺织品与服装设计等领域的应用。张聿等^[3]探讨了准规则斑图的生成方法及其在纺织设计中的应用；LIU^[4]通过变换基本数学模型衍射出大量形态各异的斑图，并开发了织物图案生成系统；罗戎蕾等^[5]探讨了准规则斑图在染织与服装图案设计中的应用；贾凤霞等^[6]研究了一种具有影光效果的准规则斑图生成方法，并将其应用于服装纹样设计。可见，现有研究工作多是将准规则斑图结合织造实验进行探讨，然而并未对准规则斑图的结构或色彩进行分析探讨。

在图像处理领域，已有色彩谱和化等方法研究如何提升图像美感。色彩谱和是指图像的色彩分布和谐统一且能给人带来愉悦的视觉感受。TANG等^[7]提出一种基于相对距离的最佳谱和模板搜索算法，且通过最小化基于图像色调局部平滑的目标函数来进行图像色彩谱和化；GUO等^[8]根据色彩谱和原理及用户情感特点对三色产品的色彩优化进行了研究；MARINO等^[9]基于色彩谱和原理提出了色彩调和、色彩非调和及色彩平衡等三种谱和化策略，以满足不同场景下增强AR可视化效果的需求。现有方法均是对已有图像的色彩进行谱和化调整，尚未有针对准规则斑图色彩谱和化方法。

因此，需有一种方法能够根据准规则斑图的生成原理改善图形的结构与色彩，以提升其图形美感，使其更好地应用于花型设计。

3 准规则斑图生成原理及其缺陷(The principle of quasi-regular pattern generation and its defect)

准规则斑图的数学模型可通过对 q 次准对称随机网进行平滑操作，即通过哈密顿量变换来获得，其标准数学模型为

$$H_q^{(0)} = \sum_{j=1}^q \cos[x \times \cos(2 \times \pi \times j / q) + y \times \sin(2 \times \pi \times j / q)] \quad (1)$$

式中， x 、 y 为绘图坐标； q 、 j 为绘图控制参数，一般取作整数； $H_q^{(0)}$ 为哈密顿量。由式(1)所确定的等高曲线族构成了呈 q 次对称的准规则斑图。

传统的准规则斑图生成方法需对等高曲线族进行一定次数的切分，其中每个分割区间的大小是任意的，再对每个分

割区间定义随机的色彩值。在具体生成过程中，首先计算每个像素的哈密顿量，再判断其所处分割区间来对该像素赋予色彩。准规则斑图的基本数学模型是唯一的，但其变换形式却是无穷的，可对式(1)所确定的数学模型进行参数变换、函数变换等以扩展生成图形的种类。

基本数学模型确定的等高曲线族的高度分布如图1所示。由图1可知，等高曲线族的高度分布是不均匀的，部分高度对应的像素数较多，部分高度对应的像素数则相对较少。

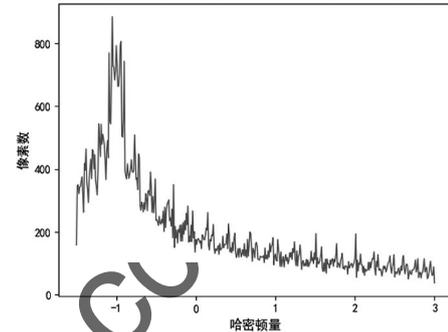
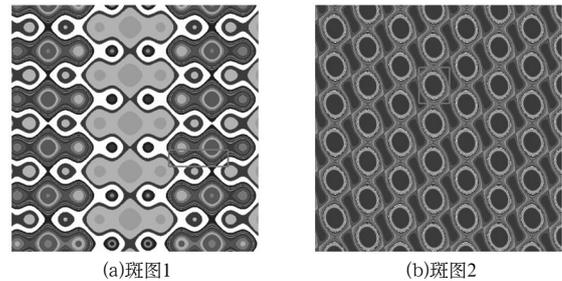


图1 基本数学模型对应等高线高度分布图

Fig.1 Basic mathematical model corresponding to the contour height distribution map

然而，在传统的准规则斑图生成方法中，等高线分割方式是任意的，这往往会导致某分割区间内像素数过少，在图形中表现为细碎的“窄色带”分布，严重影响了图形的美观程度。图2展示了传统方法生成的结构不佳的准规则斑图，例如由于图中框内“窄色带”区域分布较多，带来了一种“密集”的不良视觉效果，这不仅影响了图案的美观，且不利于后期实际织造。



(a)斑图1 (b)斑图2

图2 传统方法生成的准规则斑图

Fig.2 Quasi-regular pattern generated by traditional method

可见，由于传统的准规则斑图生成方法其等高线分割方式是任意的，导致图案的花型结构呈“窄色带”分布；色彩赋值也是随机的，导致图案色彩的随机性较大且不符合美学规则。

4 生成方法(Generation method)

本文基于等高线均匀分割的色彩谱和准规则斑图生成方

法如下所述。

(1)等高线分割：依据直方图均衡化的基本思想，优化出一种合理的等高线分割方式。

(2)色彩赋值：依据色彩谱和模板，通过映射函数将等高线分割区间内的色彩定义在谱和模板的扇区范围内。

4.1 色彩谱和模板

色彩谱和模板是被广泛研究应用的一种色彩谱和规则^[7-9]，它强调色彩谱和是由色彩在色轮(由HSV颜色空间中色调分量均匀分布所形成的环状结构，取值范围为 $0^\circ - 360^\circ$)上的相对位置决定的。色彩谱和模板灰色扇形区域内的色彩是和谐分布的，且经过旋转后其色彩依然保持谐和性。常见的七种色彩谱和模板如图3所示。

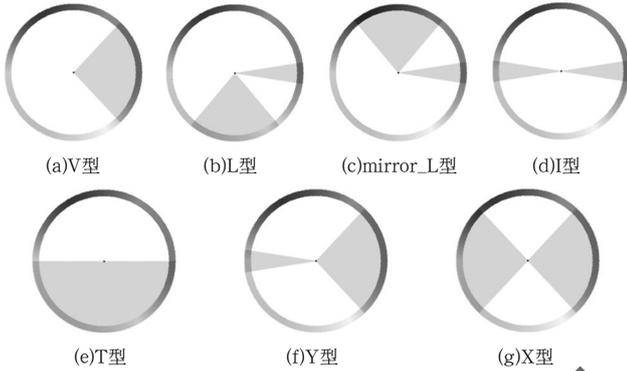


图3 色轮上不同类型的色彩谱和模板

Fig.3 Different types of color harmonious templates on the color wheels

4.2 等高线分割

本部分借鉴直方图均衡化的基本思想(将一幅图像的直方图分布变成近似均匀分布，从而使图像的明暗分布均匀)，根据哈密顿量定义等高线分割区间，使各分割区间内的像素尽可能均匀，并使各区间对应的色调处于色彩谱和模板的扇区范围内，具体步骤如下所述。

(1)确定色彩谱和模板及扇区旋转角度 θ (范围为 $0^\circ - 360^\circ$)，记录扇区数目 w (w 为1或2)及各扇区的上下界 $upbound_w$ 、 $lowbound_w$ ，同时确定扇区范围内拟采用的色彩数 M 。

(2)迭代准规则斑图数学模型，计算所有像素点的哈密顿量，并统计出最大值及最小值 H_{max} 、 H_{min} 。

(3)将所有哈密顿量量化到 N_H 个区间中， N_H 可由式(2)计算所得：

$$N_H = \sum_w lowbound_w - upbound_w \quad (2)$$

则每个区间的步长 S_{bin} 计算方式如下：

$$S_{bin} = (H_{max} - H_{min}) / N_H \quad (3)$$

(4)为使各分割区间内的像素数目均匀，本文以方差 V_b 衡量各区间内像素数目的离散程度，且当其最小化时，可认为当前等高线分割方式最优：

$$\arg \min_{\{b_i\}} V_b = \frac{\sum_{i=1}^{N_H} (b_i - \bar{b})^2}{N_p} \quad (4)$$

其中， b_i 为每个区间的像素数， \bar{b} 为所有区间的平均像素数， N_p 为图像的总像素数。为最小化目标函数式(4)，本文通过“超出分割”及“较小合并”两种方法调整各区间内的像素数。

首先遍历所有区间，然后对于像素数较多的区间，将其分割成步长更小的区间。分割阈值 T_b 的计算方式如下：

$$T_b = \frac{N_p}{M} \times \sigma \quad (5)$$

其中， σ 为0—1的常量。分割份数 X_i 的计算方式如下：

$$X_i = \lfloor b_i / T_b \rfloor \quad (6)$$

相应地，分割后每份区间的像素数计算方式如下：

$$b_i^j = \begin{cases} T_b, & j \in \{1, 2, \dots, X_i - 1\} \\ b_i - T_b \times (X_i - 1), & j = X_i \end{cases} \quad (7)$$

在进行以上“超出分割”步骤处理后，所有区间的像素数均会小于分割阈值。接着，再次遍历所有区间，对像素数较小的区间进行合并聚类。在遍历过程中，本文应用贪心算法的基本原理决定是否合并相邻的两个区间，即每次都选择当前局部最优解，以期最终得到全局最优解。具体的贪心策略为

$$\{b_i\} = \min \{V_b^{combine}, V_b^{uncombine}\} \quad (8)$$

其中， $V_b^{combine}$ 表示合并相邻区间后的方差， $V_b^{uncombine}$ 表示不合并相邻区间后的方差。即在遍历区间的过程中，通过式(8)判断合并相邻区间后是否会导致整体方差的减小，并以此确定方差较小的分割区间定义方式。

为取得良好的合并结果，本文从哈密顿量的上下界处交替进行上述“较小合并”步骤。当遍历完所有区间时，可认为当前等高线分割方式是最优的，即各分割区间内的像素数是较为均匀的。

4.3 色彩赋值

确定完等高线分割方式后，再对每个区间的所有像素赋予色彩。本文的色彩赋值操作在HSV颜色空间中进行，具体步骤如下所述。

(1)迭代准规则斑图数学模型，计算每个像素的哈密顿量并判断其所处等高线分割区间。统计出每个区间的所有像素坐标及平均哈密顿量。

(2)由于HSV颜色空间模型是一种直观的颜色空间模型，

可通过固定颜色的饱和度、亮度指定色调的方式来获得任意一种纯色彩。本文固定每个分割区间色彩的饱和度 C_s 、亮度 C_v 分别为最大值100，色调 C_H 则通过以下过程计算。

由于在扇区范围内采用了 M 种色彩，等价于将谐和模板扇区覆盖的色调范围分成了 M 个区间，可通过式(9)计算扇区范围内色调变化的步长。

$$S_w = \lfloor (upbound_w - lowbound_w) / M \rfloor \quad (9)$$

当前等高线分割区间所处的色彩区间 K 可由式(10)计算：

$$K = \lfloor (1 / (1 + e^{-\bar{h}_i})) \times \sigma \bmod M \rfloor \quad (10)$$

其中， σ 为大于0的常量， \bar{h}_i 为每个区间所有像素的平均哈顿顿量。为扩大相邻等高线分割区间的色差，使生成的图像颜色分明，对于只有一个扇区的谐和模板，本文从扇区的上下边界处开始交替为等高线分割区间赋予颜色，具体的色调计算方式如下：

$$C_H = \begin{cases} lowbound_1 + K \times S_1 & K \bmod 2 = 0 \\ upbound_1 - K \times S_1 & K \bmod 2 \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$

对于有两个扇区的谐和模板，本文根据分割区间的奇偶性从两个扇区的下边界处开始交替赋予颜色，具体的色调计算方式如下：

$$C_H = \begin{cases} lowbound_1 + K \times S_1 & K \bmod 2 = 0 \\ lowbound_2 + K \times S_2 & K \bmod 2 \neq 0 \end{cases} \quad (12)$$

(3)计算得到所有分割区间的色彩值后，将每个分割区间的所有像素赋值为统一的色彩值，并由HSV颜色空间转为RGB颜色空间进行显示。

本文方法生成的准规则斑图如图4所示，图中应用了不同的模型类型及扇区旋转角度来生成图形。由图4可知，生成图像的色彩均能够较好地体现灰色扇区的色调，且“窄色带”区域的分布显著减少，花型结构较为协调美观。

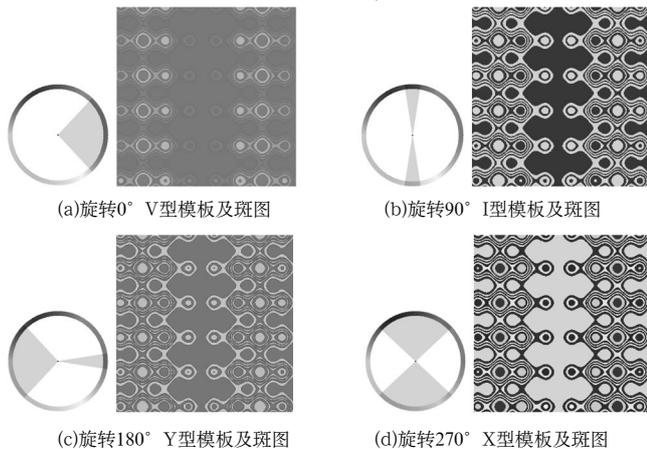


图4 应用不同色彩谐和模板生成的准规则斑图

Fig.4 Quasi-regular pattern generated by different color harmonious templates

图4中准规则斑图的数学模型如下：

$$H_q^{(0)} = \sum_{j=1}^q \cos[x \times \cos^{15}(2 \times \pi \times j / q) + y \times \sin^{15}(2 \times \pi \times j / q + 0.5)] \quad (13)$$

5 实验(Experiment)

为验证本文方法的合理性，首先对同一数学模型运用传统方法及本文方法生成准规则斑图，以证明本文方法能够生成结构协调美观的图形；其次通过一项用户研究进一步证明本文方法能够生成符合大众审美的图形。

5.1 与传统方法的对比

为证明本文方法能够生成结构协调美观的准规则斑图，分别对同一数学模型运用传统方法及本文方法生成准规则斑图(为保证比较的合理性，两种方法等高线分割区间的色彩均取自相同的色彩谐和模板)，其结果如图5所示，图中每一行从左至右分别为传统方法生成的图形、本文方法生成的图形及相应的色彩谐和模板。

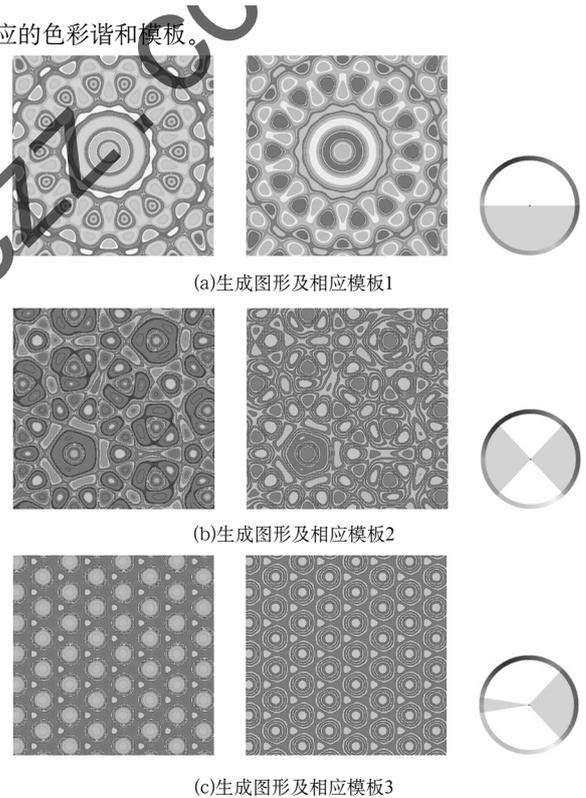


图5 不同方法生成的准规则斑图及相应色彩谐和模板

Fig.5 Quasi-regular patterns generated by different methods and corresponding color harmonious templates

由图5可知，传统方法生成的准规则斑图，其部分花型区域的像素数较少，较易出现“窄色带”分布的情况，给人一种“密集杂乱”的视觉感受，影响了图案整体的美观。而本文方法生成的准规则斑图，其花型区域的像素分布较为均匀，色带较宽且清晰，给人一种“清爽自然”的视觉感受，有力地

改善了准规则斑图图案的形状结构, 增强了图案的美感。

5.2 用户研究

图形美感与每个人各自的审美评判有关, 较难以统一的标准进行衡量。为证明本文方法能够生成符合大众审美的准规则斑图, 对不同方法生成的图形展开定量用户研究。

首先分别运用传统方法(等高线分割任意且色彩赋值随机)及本文方法依据同一数据模型生成图形, 而后随机挑选出40组图形作为测试用例。然后对于每组图片, 用户需根据以下主观评价指标进行评分。

- (1)图形的结构是否协调(1表示不协调, 5表示协调);
- (2)图形的色彩是否和谐(1表示不和谐, 5表示和谐);
- (3)图形的整体视觉效果是否美观(1表示不美观, 5表示美观)。

用户研究共有30名参与者, 他们均为审美正常的学生。实验开始前, 会简要介绍上述评价指标的含义, 评价分数为1—5, 最终由用户依据个人主观感受对测试图片进行打分。为避免偏误, 本文随机排序不同方法生成的图形, 且为防止审美疲劳, 给予用户充足的休息时间。

本用户研究共收集有效问卷25份。为便于统计分析, 对两种方法生成图形的每项指标的评分求取均值, 其结果如图6所示。由图6可知, 本文方法在图形色彩、结构及整体视觉效果三项指标上的评分均高于传统方法。由此可见, 本文方法有效地改善了传统准规则斑图的结构与色彩, 生成了富有美感的准规则斑图。

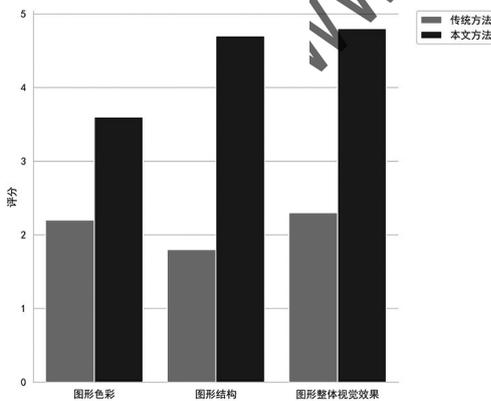


图6 不同方法生成图形的评分均值

Fig.6 Average scores of graphs generated by different methods

6 结论(Conclusion)

本文从图形结构与色彩层面, 提出一种提升准规则斑图

美感的方法。首先从减少“窄色带”分布的角度出发, 以等高线各分割区间内像素的方差最小化为目标, 优化出一种合理的等高线分割方式; 其次基于色彩谐和模板, 通过映射函数将等高线分割区间的色彩定义在色彩谐和模板的扇区范围内, 最终生成结构协调且色彩谐和的准规则斑图。

实验结果表明, 相比于传统方法, 本文方法生成的准规则斑图的结构更加协调美观。进一步的用户研究也表明本文方法生成的图形在色彩、结构及整体视觉效果方面均有优势。综上, 本文方法有效地改进了传统方法, 生成了富有美感的准规则斑图, 使其能够更好地应用于花型设计。

参考文献(References)

- [1] 张聿,李栋高. 纺织设计中的非线性科学可视化方法初探[J]. 纺织学报,2002,23(5):27-31.
- [2] 汪秉宏.弱混沌与准规则斑图[M].1版.上海:上海科技教育出版社,1996:125-130.
- [3] 张聿,付岳莹.基于准规则斑图的纺织设计方法[J].纺织学报,2005,26(5):58-62.
- [4] LIU S Y. The generation system of textile pattern draft based on quasi-regular pattern theory[J]. International Journal of Information Engineering and Electronic Business, 2009, 1(1):50-57.
- [5] 罗戎蕾,洪潘.基于数学方法的流行几何图案设计[J].纺织学报,2014,35(3):141-144.
- [6] 贾凤霞,张聿.应用影光型准规则斑图的服装纹样设计方法[J].纺织学报,2017,38(7):124-129.
- [7] TANG Z, MIAO Z ,WAN Y, et al. Color harmonization for images[J]. Journal of Electronic Imaging, 2011, 20(2):1-12.
- [8] GUO F, LI F X, NAGAMACHI M, et al. Research on color optimization of tricolor product considering color harmony and users' emotion[J]. Color Research and Application, 2020, 45(1):156-171.
- [9] MARINO E, BRUNO F, LIAROKAPIS F. Color harmonization, deharmonization and balancing in augmented reality[J]. Applied Sciences, 2021, 11(9):3915-3934.

作者简介:

胡天鸿(1996-), 男, 硕士生.研究领域: 计算机图形图像处理。