

文章编号:0253-9721(2012)02-0125-06

# Voronoi 图在蜡印冰纹仿真中的应用

唐颖<sup>1</sup>, 房宽峻<sup>1,2</sup>, 沈雷<sup>1</sup>, 付少海<sup>1</sup>, 张连兵<sup>1</sup>

(1. 生态纺织教育部重点实验室(江南大学), 江苏 无锡 214122;

2. 青岛大学纤维新材料与现代纺织国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266071)

**摘要** 在绘制数字化的蜡印图案中,为模拟手工蜡印中冰纹自然龟裂的状态,提出一种基于 Voronoi 图的仿真方法。首先在蜡印图案上随机确定 Voronoi 图的基点位置,生成标准 Voronoi 图;然后选取位于图案中的 Voronoi 线段,以 Voronoi 边界交点作为起点,在原始 Voronoi 边界的传播方向上加入 Perlin 噪声,生成新的 Voronoi 边界;最后通过数目、噪声等控制系数使仿真冰纹接近自然开裂效果,得到最终的仿真蜡印图案。结果表明,所提算法模拟出的蜡印冰纹具有较好的连贯性和网络性,符合真实蜡印图案的冰纹特征。

**关键词** 蜡印图案;冰纹;计算机仿真;Voronoi 图;Perlin 噪声

中图分类号:TS 941.26 文献标志码:A

## Rendering cracks in wax printing designs using Voronoi diagram

TANG Ying<sup>1</sup>, FANG Kuanjun<sup>1,2</sup>, SHEN Lei<sup>1</sup>, FU Shaohai<sup>1</sup>, ZHANG Lianbing<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Eco-Textiles (Jiangnan University), Ministry of Education, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Laboratory of Fiber Materials and Modern Textiles, The Growing Base for State Key Laboratory, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

**Abstract** When preparing digital wax printing designs, a simulation method based on Voronoi diagram is selected for simulating the naturally cracked patterns of handmade wax printing. Firstly, the positions of the Voronoi sites are determined randomly in digital wax printing designs; then the standard Voronoi diagram is obtained. The Voronoi boundary needs to be picked out from the wax region, taking the intersection of the Voronoi boundary as the starting point. Perlin noise is introduced in the spread direction of the original Voronoi diagram and a new Voronoi boundary is generated. Finally, the simulated cracks similar to natural ones are achieved via adjusting the coefficients such as number and noise. The experimental results show that the proposed method can imitate authentic wax crack designs with good consistency and network, that meet the crack characteristics of the real wax printing designs.

**Key words** wax printing design; crack; computer simulation; Voronoi diagram; Perlin noise

蜡印图案是人们非常喜爱的少数民族图案之一,随着世界纺织品市场掀起的回归自然、返璞归真的消费时尚,具有悠久历史和民族风格的蜡印花布在国际国内市场上非常流行,但蜡印花布的制作工艺繁复,其工业生产时产生的废蜡对环境存在较大

的污染<sup>[1-2]</sup>。因此,用计算机进行蜡印图案的仿真绘制是近年来设计师不断追求的目标,而蜡印图案中自然产生的冰纹效果是绘制的难点。

目前采用计算机绘制蜡印冰纹的方法主要有2种:一种是使用 Photoshop、Illustrator 等图形处理软

收稿日期:2011-03-09 修回日期:2011-08-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(20474025);教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-04-0495);江苏省自然科学基金资助项目(BK2007021);国家科技支撑计划资助项目(2007BAE40B01)

作者简介:唐颖(1983—),女,讲师。主要研究方向为纺织新技术与服装设计。房宽峻,通信作者,E-mail:fangkuanjun@vip.sina.com。

件在数字蜡印图案中直接绘制冰纹<sup>[3]</sup>,或是通过扫描手工蜡印冰纹图案直接复制到新创作的蜡印图案中<sup>[4]</sup>,这种方法为一般设计师所采用,操作简单,但工作量很大,如果同一幅蜡印图案需要得到不同的冰纹效果,则需在计算机中反复进行绘制,需要耗费大量的时间;另一种方法是基于距离变换算法在计算机中仿真冰纹<sup>[5-6]</sup>,这种算法可方便快捷地模拟蜡印冰纹的大体形态,但由于算法本身的一些局限性,使得生成的冰纹不够连贯,与真实的蜡印冰纹存在一定差异。

本文提出了一种基于 Voronoi 图的蜡印冰纹模拟算法。有关 Voronoi 图在裂纹生成领域的应用有不少研究,Raghavachary<sup>[7]</sup>描述了一种基于 Voronoi 多边形网格生成脆性材料表面发生的裂纹和碎片的方法,通过在特定的多边形网格的每个面上合成 Voronoi 多边形,以及分解邻近多边形的公用边连续生成裂纹。Mould<sup>[8]</sup>利用加权 Voronoi 图来仿真生成基于特定图案的裂纹效果,不仅模拟出了具有真实感的裂纹,并且使得图案与裂纹融为一体。Imagire 等<sup>[9]</sup>模拟了 3-D 环境下物体发生破裂时产生的碎片,主要关注了物体碎裂时产生的小碎片和灰尘,并从物体发生破裂时所受的能量场出发,主要采用 Voronoi 算法建立模拟裂纹的 3-D 环境。以上文献表明,Voronoi 图能较好地模拟物体自然开裂的状态,但主要集中在对陶瓷、墙体等物体开裂方面的研究。本文将 Voronoi 图引入到蜡印图案的仿真模拟,结合冰纹的特征提出了新的算法,实验结果表明此方法能模拟出较真实的蜡印冰纹图案。

## 1 Voronoi 图定义

Voronoi 图最早于 1908 年由俄国数学家 Voronoi 提出<sup>[10]</sup>,它实现的是对空间区域的合理划分,由于 Voronoi 图具有最近性、邻接性等众多性质和较完善的理论体系,如今已经在机械工程、图像处理、物理、化学和分子生物学等领域得到广泛应用。本文主要参考了 Berg 等介绍的 Voronoi 图计算方法<sup>[11]</sup>。标准 Voronoi 图如图 1 所示。

Voronoi 图的定义,在平面上选择一组点集  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ,其中任意 2 点都不共位,即  $p_i \neq p_j$  ( $i \neq j, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n$ ),且任意 4 点不共圆。 $P$  中的每个点都称作 1 个基点。对于区域中任意 2 个节点  $P_i(i_x, i_y)$  和  $P_j(j_x, j_y)$ ,采用欧式距离计算它们之间的距离,即

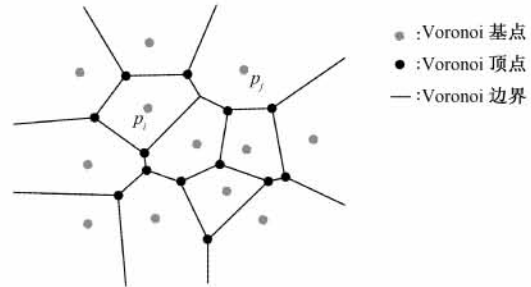


图 1 标准 Voronoi 图

Fig. 1 Example of Voronoi diagram

$$d(i, j) = \sqrt{(i_x - j_x)^2 + (i_y - j_y)^2} \quad (1)$$

将每个节点与其距离最近的节点相连,可将整个区域分成图 1 所示的不同小区域。其生成过程具有以下特点:生成的图像具有真实感;生成过程可以人为控制。

Voronoi 图的优势在于提供了一种较为均匀的网络结构,这种网络结构非常符合手工蜡印中冰纹自然龟裂的情况,且生成的冰纹具有较好的连贯性,因此 Voronoi 图可被作为工具,用来生成仿真蜡印冰纹图像。

## 2 蜡印冰纹仿真算法

### 2.1 蜡印冰纹的特征

蜡印冰纹的产生,是由于在染色过程中,蜡层龟裂,染液顺着裂缝浸入布地,使留白部分出现互相交织的纹理而形成<sup>[12]</sup>。蜡在自然开裂的状态下,形成网络状分布的龟裂冰纹最为常见。图 2 是手工制作的蜡印冰纹图案。可看出,蜡在自然开裂情况下形成的冰纹呈随机状态分布,线条有不同粗细,冰纹交叉处有不同程度的加粗,加粗方式为从交叉点向冰纹延伸方向逐步变细。冰纹的线条从整体上看较直,在细节上呈现一定的曲度和弧度,但并不是严格的直线。

### 2.2 仿真算法过程

由蜡印冰纹的特征可知,其一般情况下分布的特点是具有网络性和随机性,体现了 Voronoi 图的基本特性。在生成冰纹前,首先在图案中随机分布 Voronoi 基点,生成标准 Voronoi 图。通过预先设置冰纹的宽度变化值,由计算机在设置的像素范围内随机选择,以模拟出真实冰纹不同粗细的效果。对生成的 Voronoi 线段进行渲染处理,通过控制基点数目和加入 Perlin 噪声<sup>[13]</sup>等系数使仿真冰纹接近



图 2 自然龟裂的蜡印冰纹  
Fig.2 Effect of natural wax cracking

自然开裂的效果。

由于生成的标准 Voronoi 图的网络结构覆盖面非常广,导致很多的 Voronoi 顶点落在了图案的外面,而在图案上的顶点扩散出去的边界只是一部分,所以在生成冰纹图案时分 2 部分计算:第 1 步, Voronoi 顶点在图案上;第 2 步, Voronoi 边界覆盖在图案上且两端点在图案外面。

对于第 1 步,首先将位于图案上的顶点挑选出来,从而对从该顶点出发的边界进行计算及重新生成。方法是对每个 Voronoi 顶点出发的 3 条线段提取出起始点  $P_{start}(x_{start}, y_{start})$  和终止点  $P_{end}(x_{end}, y_{end})$ ,并获得各自的斜率

$$A = \frac{y_{end} - y_{start}}{x_{end} - x_{start}} \quad (2)$$

对斜率  $A$  加入 Perlin 噪声  $\epsilon_{noise}$ ,从起始点  $P_{start}$  开始,利用直线方程计算下一点  $P_{next}(x, y)$ :

$$y - y_{start} = (A + \epsilon_{noise})(x - x_{start}) \quad (3)$$

采用起始像素的 8 邻域模型,因为这 8 个邻域像素都是整数,所以在获得新的  $x$  和  $y$  时需要取整,并将新的像素作为新的起始点,依次传播下去。此扩展过程的终止条件是碰到图案边界,或者超出了原来终止点的横坐标和纵坐标范围。

对于第 2 步,在所有 Voronoi 边界线段中找出与图案相交的,同时顶点在图案外部的候选线段。渲染方法与上面第 1 部分相同,利用起始点和终止点,将每条 Voronoi 边界进行滤波处理,同时在传播方向上加入 Perlin 噪声,生成新的 Voronoi 边界,最后进行交叉点加粗等自然化处理。

对冰纹交叉点加粗的具体算法如下:设  $q$  点为冰纹  $L_1$  和  $L_2$  的交点,同时设定交叉点加粗的范围值,即扩散半径为  $r$ 。加粗效果则在以  $q$  为圆心,  $r$  为半径的圆内进行处理,如图 3 所示。

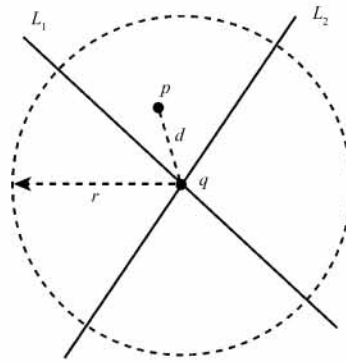


图 3 冰纹交叉处加粗  
Fig.3 Definition of intersection boldness

为了使得到的加粗性质符合真实蜡印冰纹开裂的情况,则交叉处的形状应近似双曲线。设加粗范围值内的某点  $p$  到  $q$  点的距离为  $d$ ,  $p$  位置处与最近冰纹的距离值为  $D(p)$ ,利用双曲线的变量性质可知需满足以下条件:

$$D(p) \times d < C, p \in B \quad (4)$$

其中  $C$  为常量,  $B$  表示交叉点加粗的范围。这样在欧式距离和变换距离 2 个变量间进行约束,来决定半径为  $r$  的范围内哪些点在扩散范围上。半径  $r$  和常量  $C$  是影响交叉点加粗情况的主要参数。

### 2.3 蜡印图案中的冰纹仿真

首先准备一张在 Illustrator 中绘制好图案的数字蜡印原稿,把需要做冰纹的图案部分留出空白或填上浅色,其他背景部分填上靛蓝色或其他较深的颜色,如图 4 所示。

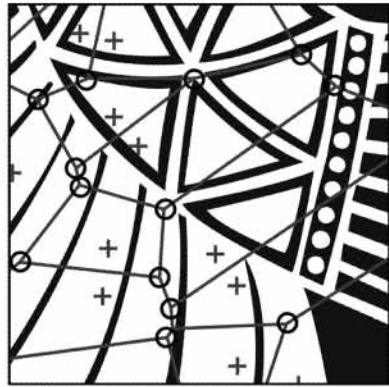


图 4 数字蜡印原稿  
Fig.4 Original digital wax printing pattern

在数字蜡印原稿中随机选取基点生成标准 Voronoi 图,即可得到图 5。其中图 5(b)为(a)图左下角灰色方框区域的局部放大图。图中“+”为随机选取的 Voronoi 基点,灰色线段为 Voronoi 图的边



(a) 完整 Voronoi图



(b) 局部放大图

图 5 在数字蜡印原稿中生成的标准 Voronoi 图  
 Fig.5 Standard Voronoi diagram in digital wax printing pattern. (a) Complete Voronoi diagram; (b) Partial enlarged view

界,黑色圆圈为 Voronoi 边界的顶点。

在得到完整的 Voronoi 图后,仅保留需要生成冰纹图案区域的基点,生成的 Voronoi 图边界只取图案上的部分。加入 Perlin 噪声,使冰纹呈现自然的抖动,并控制冰纹粗细因子随机加粗部分冰纹,同时进行交叉点加粗的效果处理,获得最终的蜡印冰纹仿真图案。

### 3 仿真结果与分析

#### 3.1 不同参数下的冰纹仿真结果

在冰纹仿真算法过程中涉及到多个参数的配置,为达到最符合真实蜡印冰纹的仿真效果,需要对这些参数进行不同数值的调配。采用 MATLAB 作为程序仿真平台,通过调整冰纹相关参数来生成不同冰纹效果的蜡印图像,如图 6 所示。图 6(a)~(c)分别为设置了不同冰纹数目、粗细因子、Perlin 噪声和交叉区域影响范围的仿真效果,具体参数见表 1。图中冰纹的颜色均设置为与底色相同的靛蓝。

Voronoi 图的基点数目决定了蜡印仿真图案中的冰纹数目,图 6(a)~(c)设置的基点数目分别为 150、250、350 的冰纹效果,可看出,随着参数的增加,在同幅蜡印图案中可生成有明显疏密差异的冰纹效果,呈随机网络状分布。



(a) 冰纹数目为150条



(b) 冰纹数目为250条



(c) 冰纹数目为350条

图 6 调整参数生成不同冰纹效果的蜡印图案

Fig.6 Simulation effects of natural cracks of different parameters.

(a) 150 crack numbers; (b) 250 crack numbers; (c) 350 crack numbers

表 1 冰纹生成的主要参数表

Tab.1 Main parameters of crack generating

分图	基点数目	冰纹粗细因子	Perlin 噪声	交叉区域影响范围	
				长度	宽度
图 6(a)	150	2	0.02	3	1
图 6(b)	250	4	0.04	4	1.5
图 6(c)	350	6	0.06	5	2

冰纹粗细因子是关于不同冰纹间粗细差异的,参数越大,则冰纹间粗细差异越大,作用方式为每条冰纹生成前随机选择自己的粗细度。图 6(a)中冰纹粗细因子为 2,冰纹线条较为均匀,几乎没有粗细变化。从图 6(b)、(c)中可看出,随着数值加大,冰纹间粗细差异明显,符合自然条件下的冰纹生成情况。



Perlin 噪声是调整冰纹弯曲程度的参数,从图中可看出,随着加入 Perlin 噪声从小到大,冰纹的弯曲效果也逐步加大。图 6(a) 中冰纹抖动系数为 0.02,图中冰纹几乎接近直线,效果较生硬,在图 6(b)、(c) 中逐步加大 Perlin 噪声系数,冰纹呈现自然的抖动效果,较好地模拟出真实蜡印图案中冰纹的状态。

对蜡印图案中冰纹交叉区域加粗的仿真涉及到 2 个参数,即交叉区域的长度和宽度。为获得真实蜡印冰纹的效果,需要同时调整这 2 个参数,随着设置长度和宽度的数值增大,冰纹的交叉区域呈现自然的加粗变化,加粗范围是从交叉点向冰纹的延伸方向逐步变小。

从图 6 中生成的不同冰纹效果的仿真图案可看出,在选取合适参数的基础之上,本文算法能够模拟

出较为真实的蜡印图案。同时,设置的参数不同,在同幅蜡印图案中可生成有明显差异的冰纹效果。在仿真操作中,可根据实际需要的冰纹效果来确定最终的参数值。

### 3.2 Voronoi 图与距离变换算法的效果对比

基于距离变换的冰纹仿真算法<sup>[5-6]</sup>是在获得距离变换图后,将分裂起始点选择在图案中的局部距离最大点上,然后向与图案边界最近距离处依次裂开,单独采用距离变换算法得到的效果图如图 7(a) 所示。由于在距离变换图中,从起始点向左右两边扩展裂开的方向不一定完全一致,经常会形成一定的夹角,这样生成的冰纹会显得不够流畅自然。从图 7(a) 中的局部放大图可看出,仿真的冰纹线条中出现一些“折线”和“U”型线段,不符合真实蜡印冰纹的生成情况。

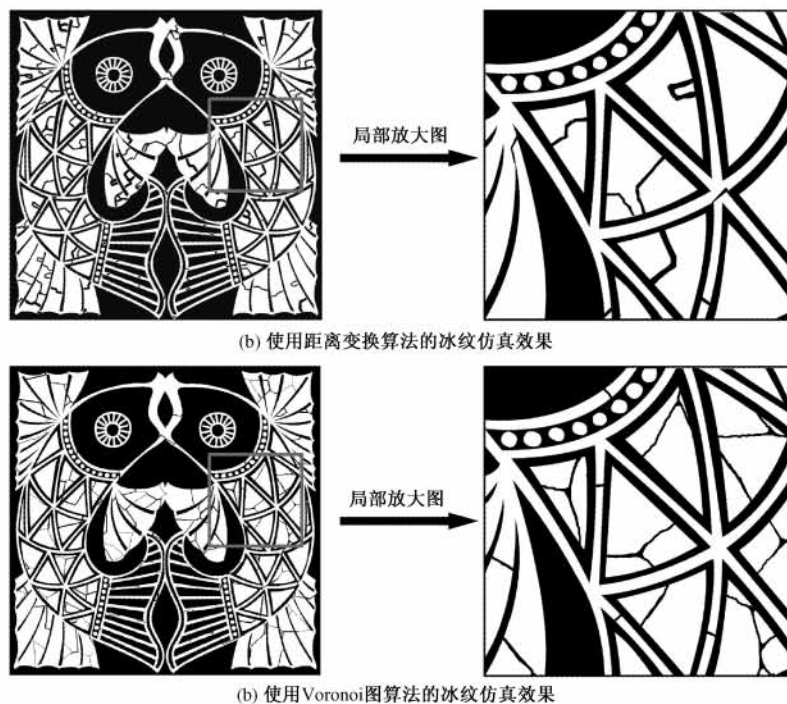


图7 使用 Voronoi 图与距离变换算法的冰纹仿真效果对比

Fig.7 Comparison of crack effects generated by Voronoi diagram with distance transformation.

(a) Crack effects generated by distance transformation; (b) Crack effects generated by Voronoi diagram

基于 Voronoi 图生成的冰纹避免了这种情况的出现,因为 Voronoi 图中的冰纹线条是一条一条生成的,而不是一半一半生成的,这样连贯性会好很多,如图 7(b) 所示。从图 7(b) 局部放大图中可看出,基于 Voronoi 图方法生成的冰纹更加自然,总体冰纹线条呈网络状分布,较好地模拟出真实蜡印冰纹中的线条特征。

## 4 结 语

本文提出了一种基于 Voronoi 图的蜡印冰纹仿真方法,实验结果表明,应用本文算法能简单有效地生成与手工蜡印图案中相似的冰纹效果,实现对蜡印图案的仿真。相对于以往采用距离变换模拟冰纹

的算法,本文算法生成的冰纹具有更好的连贯性和网络性,符合真实蜡印冰纹的特征。采用计算机仿真方法模拟冰纹,能方便快捷地绘制数字蜡印图案,设计师还可借助计算机仿真实现一些特殊的冰纹效果,达到手工蜡印不能实现的视觉效果,在现代数字蜡印创作中具有广泛的应用价值。 **FZXB**

参考文献:

[ 1 ] 郭利,刘俊英. 真蜡印花的废蜡处理[J]. 印染, 2009(4):31-32.  
 GUO Li, LIU Junying. Treatment of waste wax from wax printing[J]. Dyeing & Finishing, 2009(4):31-32.

[ 2 ] SUN Li, WANG Wei, CHEN Shuilin. Innovation in removing and recovering wax from wax printed fabric[J]. AATCC Review, 2006, 6(2):29-30.

[ 3 ] 任雪玲,杨美兰. 丝绸印花图案设计蜡染技法的电脑实现[J]. 山东纺织经济, 2008(1):94-97.  
 REN Xueling, YANG Meilan. Computer techniques with silk batik pattern design[J]. Shandong Textile Economy, 2008(1):94-97.

[ 4 ] LAWRENCE G M. Digital printing and traditional surface design techniques[D]. Raleigh: North Carolina State University, 2002.

[ 5 ] WYVILL B, OVERVELD K V, CARPENDALE S. Rendering cracks in Batik[C]//Hertzmann A, Kaplan C S, Spencer S N. Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-photorealistic Animation and Rendering. New York: ACM Press, 2004: 61-149.

[ 6 ] 唐颖,房宽峻,付少海,等. 蜡染冰纹的计算机仿真研究[J]. 纺织学报, 2010, 31(3):128-132.  
 TANG Ying, FANG Kuanjun, FU Shaohai, et al. Computer simulation research on batik crack patterns[J]. Journal of Textile Research, 2010, 31(3):128-132.

[ 7 ] RAGHAVACHARY S. Fracture generation on polygonal meshes using voronoi polygons [ C ]//Appolloni T. SIGGRAPH 2002 Proceedings. New York: ACM Press, 2002:187.

[ 8 ] MOULD D. Image-guided fracture[C]//Kori I, Michiel V P. Proceedings of Graphics Interface 2005. London: A K Peters, 2005:219-226.

[ 9 ] IMAGIRE T, HENRY Johan H, NISHITA T. A fast method for simulating destruction and the generated dust and debris[J]. The Visual Computer, 2009, 25:719-727.

[ 10 ] HELD M. On the Computational Geometry of Pocket Machining[M]. Berlin: Springer, 1991:64.

[ 11 ] BERG M D, CHEONG O, KREVELD M V, et al. Computational Geometry: Algorithms and Applications[M]. 3rd Ed. Berlin: Springer, 2008:147-170.

[ 12 ] 陈宁康. 陈宁康蜡染纪念文集[M]. 上海:学林出版社, 2005:283-285.  
 CHEN Ningkang. The collection of essays on batik in memory of Chen Ningkang[M]. Shanghai: Academia Press, 2005:283-285.

[ 13 ] PERLIN K. An image synthesizer [ J ]. Computer Graphics, 1985,3(19): 287-296.