Journal of System Simulation

Volume 30 | Issue 6 Article 15

6-14-2018

Batik Dying Simulation Based on Diffusion

Yangtao Yu
1. College of People's Armed Forces Education, Yunnan University of Nationalities, Kunming 650118, China;;;2. School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650031, China;;

Zhenlu Yu
3. School of Resource and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

Wenhua Qian
2. School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650031, China;;

Keshi Zhang
2. School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650031, China;;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Original Article is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Batik Dying Simulation Based on Diffusion

Abstract

Abstract: *This paper presents a three-layer model which is composed of wax layer, warp layer and weft layer.* The wax layer wraps warp and weft layer which overlap together. *According to Fick's second law and considering dye's diffusion, absorption and supply, a differential equation is built to describe diffusion process and this equation is discretized.* Porosity, tortuosity and neighboring coefficient are used in the equation. *Rectangular weave is simulated by using ellipse-distance model and blurred in HSV color space.* Simulation shows that the satisfactory visual effect which closes to real batik cloth is acquired by the method and the algorithm needs less computation.

Keywords

three-layer model, Fick's second law;, differential equation, diffusion, HSV color space

Authors

Yangtao Yu, Zhenlu Yu, Wenhua Qian, Keshi Zhang, and Xu Dan

Recommended Citation

Yu Yangtao, Yu Zhenlu, Qian Wenhua, Zhang Keshi, Xu Dan. Batik Dying Simulation Based on Diffusion[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2117-2124.

This original article is available in Journal of System Simulation: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss6/15

第 30 卷第 6 期 系统仿真学报© Vol. 30 No. 6
2018 年 6 月 Journal of System Simulation Jun., 2018

基于扩散的蜡染染色模拟

喻扬涛[1,2]，俞振璐[3]，钱文华[2]，张可师[2]，徐丹[2*]
(1. 云南民族大学人民武装学院，云南 昆明 650118；
2. 云南大学信息学院，云南 昆明 650031；3. 电子科技大学资源与环境学院，四川 成都 611731)

摘要：*建立由封蜡层、经线层、纬线层构成的三层布料模型。*三层布料模型中，封蜡层包裹经线层、纬线层构成封蜡布，经线层与纬线层相互交叉、重叠，构成布料层。根据菲克第二定律*建立微分方程表示染料扩散过程，*并对该微分方程离散化。扩散方程中考虑的主要因素有染料扩散、供给、吸收，扩散方程中使用孔隙度、弯曲程度、相邻关系等参数。*使用椭圆距离模型模拟矩形织纹，*并对其在 HSV 颜色空间中进行模糊处理。实验表明，文中方法可以得到接近实际蜡染布料的视觉效果。算法具有较好的时间复杂度。

关键词：*三层布料模型；菲克第二定律；微分方程；扩散；*HSV 颜色空间
中图分类号：TP391.9 文献标识码：A 文章编号：1004-731X (2018) 06-2117-08
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806015

Batik Dying Simulation Based on Diffusion

Yu Yangtao[1,2], *Yu Zhenlu*[3], *Qian Wenhua*[2], *Zhang Keshi*[2], *Xu Dan*[2*]
(1. College of People's Armed Forces Education, Yunnan University of Nationalities, Kunming 650118, China;
2. School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650031, China;
3. School of Resource and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: *This paper presents a three-layer model which is composed of wax layer, warp layer and weft layer.* The wax layer wraps warp and weft layer which overlap together. *According to Fick's second law and considering dye's diffusion, absorption and supply, a differential equation is built to describe diffusion process and this equation is discretized.* Porosity, tortuosity and neighboring coefficient are used in the equation. *Rectangular weave is simulated by using ellipse-distance model and blurred in HSV color space.* Simulation shows that the satisfactory visual effect which closes to real batik cloth is acquired by the method and the algorithm needs less computation.

Keywords: three-layer model; Fick's second law; differential equation; diffusion; HSV color space

引言

蜡染是我国西南地区少数民族广泛流行的传统技艺，其工艺独具特色，图案清新自然。云南蜡染作品自然朴实，充分展现了云南少数民族风情。然而传统手工印染技术生产效率低、污染大，导致蜡染产业举步维艰，蜡染模拟方法势在必行。

蜡染作品主要组成部分为图案、冰纹和布料染色，在计算机模拟中，主要对冰纹和布料染色效果进行模拟。冰纹模拟中，现有基于生长的方法和基于分形的方法均可产生接近实效的冰纹。布料模拟方面，很多学者对布料的虚拟缝合、垂悬模拟、污渍效果、布料动画等进行了研究，并已取得一定

收稿日期：2016-04-14 修回日期：2016-08-04；
基金项目：国家自然科学基金(61163019，61271361，61462093)，云南省教育厅(2015Y225，2015Z012)，云南省应用基础研究计划项目(2014FB113)；
作者简介：喻扬涛(1973-)，男，云南宣威，博士，副教授，研究方向为非真实感图形绘制。

Published by Journal of System Simulation, 2018

Journal of System Simulation, Vol. 30 [2018], Iss. 6, Art. 15

成效。相较而言，针对蜡染布料视觉特征模拟的研究较少。蜡染布料视觉特征产生的原因主要是染料在织物中的扩散和不均匀分布。本文以蜡染中常用的平织纹布料为对象，建立三层织物染制结构，遵循菲克第二定律，采用扩散的方法对蜡染图案及冰纹布料染色的视觉特征进行模拟。

1 相关工作

蜡染仿真的工作主要包括冰纹模拟和布料染色模拟两大部分。冰纹模拟方面，主要方法有 3 种：使用图形图像设计软件手工绘制[1-2]，基于图形图像的方法[3-6]，基于物理建模的方法[7-8]。

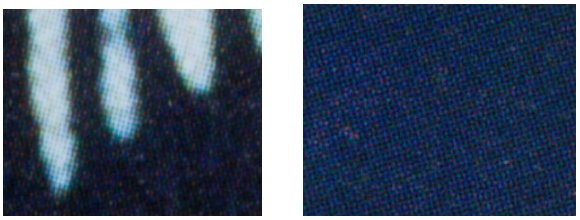
我们在文献[5]和文献[6]中也分别提出了基于图像生成冰纹的方法。

现有布料模拟，主要是针对布料的垂悬效果模拟、服装褶皱模拟、三维动画模拟、试衣模拟等，对布料的建模方法，主要有基于几何的方法、基于物理的方法、基于混合的方法。基于几何的方法，主要有悬链线模型、空心圆柱体模型网格插值方法等，Rahul 等[9]还提出一种重划网格的方法。这些方法主要对垂悬效果、褶皱、衣袖进行了模拟。基于物理的方法，Breen 等使用粒子模型模拟布料的静态垂悬效果，Volino 等在三角网格上建立粒子系统，Provot 在四边形网格上建立弹簧——质点系统，Ozgen 等提出分数阶质点模型模拟水下布料运动。Umetani 等[10]提出了将二维布料变化映射到三维服装的敏感度函数，Guan 等[11]提出一个在虚拟人物上模拟布料动画的系统，Narain 等[12]将自适应各向异性的网格划分应用到布料模拟。Rudomin[13]，Feng 等[14]使用了基于混合的方法，石敏等[15]提出一种基于实例数据分析的多精度网格布料动画方法。

布料染色模拟方面，Morimoto 等[16]基于几何折叠和扩散，针对日本扎染织纹进行了模拟，刘世光等[17]进行了布料上污渍效果的模拟。

2 蜡染染色视觉特征

蜡染常用棉线纺布，使用平织纹。本文观察平织纹布料在蜡染染色中的视觉特征，并对其进行模拟。蜡染布料常见的视觉特征主要有斑驳、矩形织纹和边缘呈梯度变化。图 1 为蜡染布料视觉特征，(a)中图案边缘具有斑驳和梯度变化特征，(b)中具有矩形织纹特征。



(a) 斑驳、梯度变化 (b) 矩形织纹

图 1 蜡染布料视觉特征

Fig. 1 Visual Characteristics of Batik Cloth

斑驳现象指图案边缘较其它部分颜色更浓，边缘不是光滑线条，呈不规则齿状排列，有时图案会产生间断。产生该现象的主要原因是棉线的经纬交叉、重叠。棉布由经线和纬线交叉、重叠而成，棉布中染料扩散主要沿棉线方向，具有明显的方向性，因而产生了斑驳现象。

矩形织纹指蜡染布料视觉上看起来有明显的矩形排列特征，而且由于纤维的绒性而导致布料有模糊、柔软的特点。产生矩形织纹的主要原因也是棉线的经纬交叉、重叠。棉线在重叠处凸起，较为明亮；在交叉处凹下，由于阴影而导致较为阴暗；凸起处较易褪色，有发白现象。

边缘呈梯度变化指染色区域与非染色区域颜色不会发生突变，而是在边缘处呈梯度变化。其原因一方面由染料扩散导致，另外一方面是融蜡边缘凝固过程中也有扩散，导致封蜡浓度沿边缘逐渐减小，因而渗入布料染料浓度逐渐增大。

3 蜡染染色模拟

蜡染染色中，棉线的交叉重叠、染料的扩散显得尤为重要。基于此，本文提出由经线层、纬线层、渗透层构成的 3 层染制结构来表示封蜡布，经线层与纬线层交叠形成布料层，渗透层即为封蜡层。为

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss6/15
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806015

模拟染料的扩散，遵循菲克第二定律[18]建立了扩散微分方程，微分方程中考虑了染料的渗透、扩散和吸收。文中还使用椭圆距离模型和图像模糊方法产生了具有绒化效果的矩形织纹。

蜡染染色模拟主要流程如图 2 所示，流程中涉及概念在 3.1 节、3.2 节、3.3 节中各有介绍。

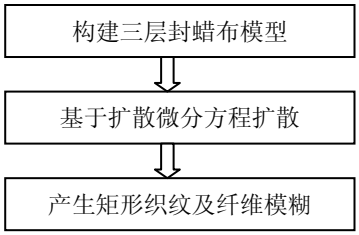
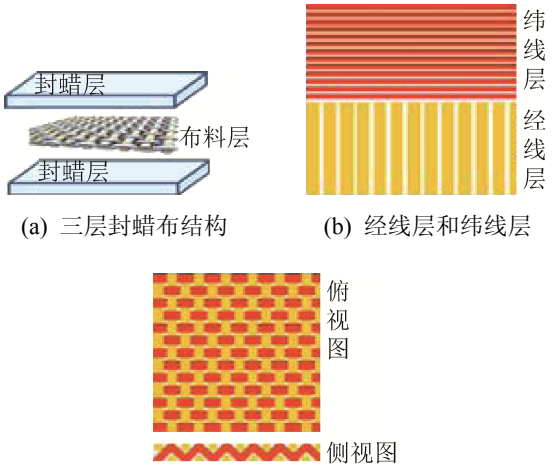


图 2　蜡染染色模拟主要流程
Fig. 2　Process of Batik Dyeing Simulation

首先构建三层封蜡布模型。这一过程主要工作包括：1) 建立经线层与纬线层交叠的两层布料结构，两层结构中经、纬线交叠如图 3(c)，对每个布料单元考虑经线在上方还是纬线在上方、布料单元中的每个扩散单元是否处于空隙上。2) 建立孔隙系数矩阵和纤维弯曲程度矩阵。3) 由于染色过程中染料扩散在棉布内部进行，其扩散方式有同层平行于棉线方向扩散、同层垂直于棉线方向扩散以及在经线层和纬线层间扩散，这些扩散都与扩散单元的相邻关系有关，因此还要建立经线层和纬线层的相邻关系矩阵。经、纬线层相邻关系矩阵由 x 正、负方向相邻关系，y 正、负方向相邻关系和 z 方向相邻关系构成，其中 x、y 方向相邻关系为同层关系，z 方向相邻关系为不同层关系。根据不同的相邻关系，相邻关系矩阵取不同的值。4) 3.2 中考虑染料扩散、供给、吸收建立了微分方程描述染料扩散，其中染料供给即为染料经渗透层渗入布料部分，因而要根据带有冰纹的白描图建立封蜡层的渗透能力图。

三层封蜡模型构建后，即可对蜡染布料的每个扩散单元依次扫描，依据式(3)计算各扩散单元当前染料浓度。式(3)中的染料浓度计算考虑与相邻扩散单元间扩散、染料的吸收和染料供给。对布料所有扩散单元的一次扫描，即为一次布料扩散。布料扩散的次数根据需求的视觉效果而定。



(a) 三层封蜡布结构　(b) 经线层和纬线层

(c) 经、纬线交叠

图 3　封蜡布模型
Fig. 3　Model of Waxed Cloth

扩散完成后，使用椭圆距离模型模拟矩形织纹并对图像进行模糊，即可得到具有实际蜡染视觉效果的模拟结果。

3.1 封蜡布模型

我们建立了由经线层、纬线层、渗透层构成的三层染制结构模型表示封蜡布。封蜡布由渗透层和布料层构成，渗透层为封蜡层，包裹布料层。布料层由经线层和纬线层交叉、重叠而成。染料经渗透层浸入经线层和纬线层，并在经线层和纬线层中扩散。实际染制中，渗透层有上、下两层。本文中考虑两渗透层作用机理相同，且具有对称性，只使用一层。根据编织方法不同，经线和纬线层进行交叉和重叠，本文仅按平织纹进行交叉、重叠。模型中，我们认为布料由布料单元组成。一个布料单元就是一个棉线的交叉、重叠单元，其参数包括经线在上或纬线在上、宽度、间隙、扩散主方向等。这些参数根据编织方法、棉线物理性质等因素由用户指定。重力在本文中忽略不计。通常布料单元宽度为棉线宽度加间隙宽度，为尽量模拟真实布料，布料单元宽度加入了随机噪声。每个布料单元由若干扩散单元组成，本文中一个像素点即为一个扩散单

Journal of System Simulation, Vol. 30 [2018], Iss. 6, Art. 15

元。该模型在染料扩散、矩形织纹模拟中均有使用。图 3 为封蜡布模型，其中(a)为三层封蜡布结构，上、下均为封蜡层，中间为经线、纬线交织而成的布料层。(b)为经线层和纬线层，空白处为间隙。(c)为经线、纬线的交织示意，上图为俯视图，下图为侧视图。

3.2 扩散模型

在如图 3 的布料结构中，染料扩散在扩散单元间进行。我们考虑的因素有染料扩散、染料供给、染料吸收。染料扩散遵循菲克第二定律，染料供给根据蜡染图案、封蜡层渗透系数等确定，染料吸收根据染料的物理性质确定。

设 $f(x,t)\in[0,1]$为扩散单元 x 在 t 时刻的染料浓度，x 与 t 相互独立。扩散可用以下微分方程表示。

$$\frac{\partial f(x,t)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(D(x)\frac{\partial f(x,t)}{\partial d}\right)+s(x,f)-a(x,f) \quad (1)$$

式(1)中，$D(x)$为扩散系数，由布料结构、扩散单元性质确定，d 为扩散单元间距离。$s(x,f)$为染料供给，$a(x,f)$为染料吸收。

$$s(x,f)=\beta p(x)(M_s(x)-f(x,t)),\beta\in[0,\frac{1}{2}]$$
$$a(x,f)=\alpha(a_d-h(x,t))f(x,t),\alpha\in[0,1] \quad (2)$$

式(2)中，$M_s(x)$为染料分布，由染制工艺、印制方法确定，本文中由于布料均为浸泡于染料中，$M_s(x)\equiv1$。$p(x)$为封蜡层的渗透能力分布，主要受冰纹的产生、蜡层厚薄等因素影响，3.3 节中将进一步讨论 $p(x)$的计算。a_d 为布料最大吸收染料浓度，h(x,t)为布料已吸收的染料浓度，该浓度每次扩散时进行累加。

将式(1)离散化。为可读性考虑，$f(x,t)$用下标方式表示。我们使用 f_i^{t+1} 表示 t+1 时刻扩散单元 i 处染料浓度，则：

$$f_i^{t+1}=f_i^t+\frac{\Delta t}{\Delta d}\gamma\sum_{j\in N(i)}D_{i,j}\frac{f_i^t-f_j^t}{\Delta d}+s_i-a_i^t$$
$$h_i^{t+1}=h_i^t+a_i^t \quad (3)$$

式(3)中 s_i、a_i^t 使用式(2)计算。式(3)中，f 的范围为[0,1]。离散形式中为确保 $f_i^{t+1}\in[0,1]$ 一方面引入系数 γ，0<γ<1，且与 $\sum_{j\in N(i)}D_{i,j}\frac{f_i^t-f_j^t}{\Delta d}$ 及 f_i 有关；另一方面，使用截断方法，若计算中 $f_i^{t+1}>1$，则 $f_i^{t+1}=1$，若 $f_i^{t+1}<0$，则 $f_i^{t+1}=0$。

式(3)中，Δt、Δd 在本文为常数，N(i)为与扩散单元 i 相邻的所有扩散单元，$D_{i,j}$ 为相邻扩散单元 i,j 的扩散系数，影响其大小的因素主要有：扩散单元 i 位于经线层、纬线层或位于间隙；位置、孔隙度、曲度等。孔隙度指纤维中空部分比例，按经、纬线设置并加入随机扰动。曲度 T 取值在 0~1 之间，该值越大，表示曲度越小，该值越小，曲度越大。

$$T=\tau_1\tau_2 \quad (4)$$

曲度 T 有两个因子：τ_1 是纤维弯曲程度，取值在 0~1 之间。其值越大，弯曲程度越小，扩散能力越强；其值越小，弯曲程度越大，扩散能力越弱。τ_2 由相邻扩散单元位置关系确定。根据扩散单元间不同层、同层平行纤维、同层垂直纤维、线内与间隙、间隙与间隙具有不同的取值。相邻扩散单元之间的位置关系有Ⅰ(同层，与线同向)、Ⅱ(同层，与线垂直)、Ⅲ(不同层)、Ⅳ(线内与间隙)、Ⅴ(间隙与间隙)，根据位置关系 τ_2 取不同的数值。图 4 为相邻扩散单元不同的 τ_2 取值。

式(3)中扩散系数 D 由下式计算：

$$D=D_0PT$$
$$D_0=3.6\sqrt{\frac{76}{M}} \quad (5)$$

D_0 表示纯染料时的扩散因子，P 为孔隙度，在 0 到 1 之间取值。M 为染料分子质量，与染料有关，对指定染料，M 取常数。

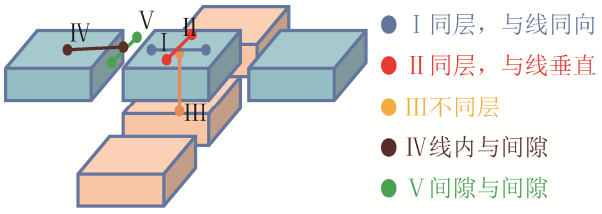


图 4 相邻扩散单元位置关系
Fig. 4 Relation of Adjacent Diffusion Cell

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss6/15
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806015

3.3 渗透能力分布

封蜡层的渗透能力分布 $p(x)$直接影响着染料供给能力，它对于斑驳现象、边缘呈梯度变化方面都起着作用。本文中渗透能力图由预染色图案经处理得到，预染色图案为白描图加入文献[7]中算法生成的冰纹，是以浓度表示的灰度图。设输入图像 $I(x)$为蜡染作品的预染浓度，$I(x)\in[0,1]$。若 $I(x)=0$ 表示为完全盖蜡区，完全防染。若 $I(x)=1$ 表示为完全浸染区，完全染色。若 $I(x)\in(0,1)$表示盖蜡区边缘或其它原因导致的透蜡区域，该区域染料有一定渗透。$I(x)$越大则蜡层越薄，渗透越强。初始渗透能力分布 $pi(x)=I(x)$。

实际封蜡时，融蜡边缘在凝固过程中会向布料进行扩散，其厚度逐渐变薄，渗透能力沿边缘增大，从而导致蜡染作品边缘呈梯度变化。我们可用到染料边缘的距离 $dist(I,x)$近似该梯度变化。实际计算中，$dist(x)$应进行截断并做归一化。计算方法见式(6)。

$$\begin{aligned} Cdist(x) &= \begin{cases} Th - dist(I,x) & if \quad dist(I,x) < Th \\ 0 & else \end{cases} \\ Ndist(x) &= normalize(Cdist(x)) \end{aligned} \tag{6}$$

式中：$normalize(Cdist(x))$表示对 $Cdist(x)$归一化，经上述计算后，$Ndist(x)$为距离的归一化表示，靠近上色区域处值大，远离上色区域处值小，超过一定阀值 Th 则为 0。$p(x)$由 $pi(x)$计算得到。具体计算如式(7)：

$$p(x) = \begin{cases} 1 & if \quad p_i(x) = 1 \, and \quad Ndist(x) = 1 \\ 0 & if \quad p_i(x) = 0 \, and \quad Ndist(x) = 0 \\ ap_i(x) + (1-a)Ndist(x) & else \end{cases} \tag{7}$$

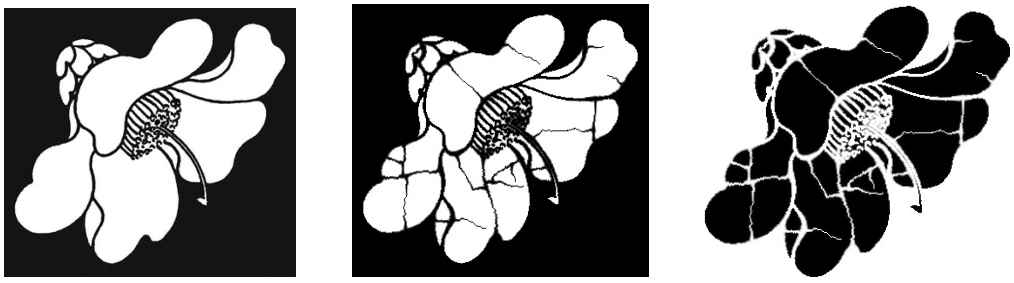
图 5 中：(a)为白描图案“花”，(b)为白描图加入冰纹后的预染图案，(c)为渗透能力图。

图 5(b)中生成了冰纹，图 5(c)中，在冰纹上和图案边缘，一方面线条被加宽，另一方面图案更模糊，呈梯度变化，体现了染料供给能力的梯度变化。

3.4 扩散算法流程

结合封蜡布模型和扩散模型，本文在封蜡布上进行扩散，模拟斑驳现象。算法流程主要包括构建三层封蜡布模型、扩散两部分。其中构建三层封蜡布模型包括构造经、纬交叠的两层结构，生成经线层、纬线层扩散系数，生成孔隙系数，生成弯曲程度系数，生成渗透能力图，初始化各扩散单元染料浓度。扩散以扩散单元(像素点)为单位进行。

经、纬交叠的两层结构中，用代码 0~5 表示当前扩散单元(像素点)处经线、纬线状态，含义如下，0：经线、纬线均为空隙；1：经线为空隙，纬线不为空隙；2：纬线为空隙，经线不为空隙；3：经、纬线都不为空隙，纬线在上；4：经、纬线都不为空隙，经线在上。经线层、纬线层扩散系数，按同层水平方向、同层垂直方向扩散系数存储。经线层与纬线层之间相邻扩散单元的扩散系数，单独存储。纬线层水平方向考虑位置关系Ⅰ、Ⅴ，垂直方向考虑位置关系Ⅱ、Ⅳ、Ⅴ。经线层水平方向考虑位置关系Ⅱ、Ⅳ、Ⅴ，垂直方向考虑位置关系Ⅰ、Ⅴ。不同层之间扩散系数考虑位置关系Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ。孔隙系数与弯曲系数为随机数。染料浓度及布料已吸收的染料浓度均存储为与输入图像大小相等的单通道图像，初始化为 0。



(a) 白描图案 (b) 生成冰纹的白描图 (c) 渗透能力分布图

图 5 渗透能力分布的生成
Fig. 5 Generation of Permeation Map

Journal of System Simulation, Vol. 30 [2018], Iss. 6, Art. 15

本文使用像素扩散算法(pixel difusing，PD)进行扩散。对布料所有扩散单元进行一次扫描，按式(3)计算每个扩散单元染料浓度为一次布料扩散。一次布料扩散分为两个步骤，第一步为由左上向右下扩散，第二步为由右下向左上扩散。布料扩散次数根据模拟需求而定。

算法 1. 像素扩散(pixel difusing，PD)

输入：染料初始浓度图像

输出：染料浓度图像

(1) 自左上向右下，对浓度图像和已吸收的染料浓度图像中每个扩散单元 i，按式(3)计算其染料浓度 f_i^{t+1} 及布料已吸收的染料浓度 h_i^{t+1}，其中 f_i^t 为扩散单元 i 原染料浓度，h_i^t 为扩散单元 i 原吸收染料浓度，计算后更新两个浓度值。

(2) 自右下向左上，对浓度图像和已吸收的染料浓度图像中每个扩散单元 i，按式(3)计算其染料浓度 f_i^{t+1} 及 h_i^{t+1}，并更新。

(3) 若布料扩散次数达到要求则终止，否则转步骤(1)。

3.5 矩形织纹及纤维模糊

棉线在重叠处凸起，表面纤维蓬松而较为明亮；在交叉处凹下，纤维紧致且有阴影而导致较为深暗。棉线凸起处染料不易扩散且容易褪色。这些因素都会导致产生布料的矩形织纹现象。

对每个布料单元，我们使用椭圆距离模型模拟矩形织纹现象。在一个布料单元中心区域，为凸起部分，用椭圆表示，该区域颜色改变量最大。其余部分，按接近椭圆程度改变其颜色，靠近椭圆处改变大，远离椭圆处改变小。褪色也按以上规律处理，同时对每个布料单元加入噪声。模拟中采用 HSV 颜色空间，颜色在 S 分量(饱和度)和 V 分量(亮度)发生变化。图 6 为真实的矩形织纹及椭圆距离模型图。图 6(a)为真实布料的放大图，图中可以明显看出矩形织纹及近似椭圆的凸起；图 6(b)为浓度夸大的放大图，其颜色变化处形状尤为接近椭圆；图 6(c)为椭圆距离模型。

$$S(x) = S_a - RationS \times (1 - Ndist(E, x))$$
$$V(x) = V_a + RationV \times (1 - Ndist(E, x)) \quad (8)$$

$Ndist(E,x)$为到椭圆的归一化截断距离传递函数。S_a 为颜料饱和值，$RationS$ 为系数，表示 S 改变的最大量。V_a 为颜料的饱和亮度，$RationV$ 为系数，表示 V 改变的最大量。以上计算中，为更接近真实效果，分别加入高斯噪声。

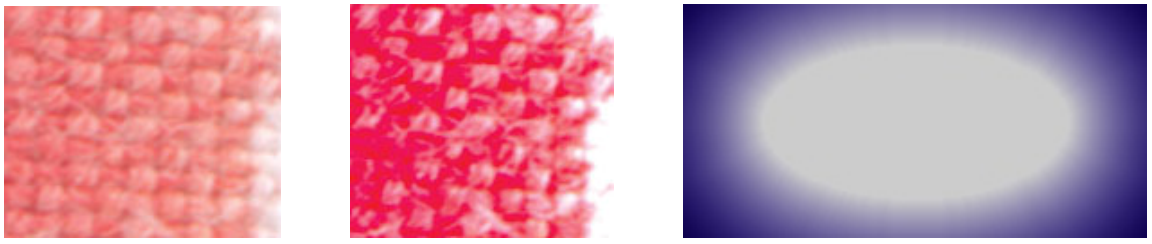
由于棉线由柔软的纤维构成，纤维的绒性会使棉线显得模糊且柔软，如图 6(a)。在矩形织纹模型基础上，我们还对蜡染图像进行高斯模糊，使图像具有一定绒性，显得更加柔软。

4 实验结果

我们使用带有冰纹的蜡染图案进行了仿真实验，实验软件平台为 Visual studio2013+opencv4.0。实验中参数设置如表 1 所示。

表 1 扩散参数设置
Tab. 1 Diffusion Parameters

序号	参数	取值	τ_2 类型	τ_2 取值
1	Δd	1	Ⅰ, Ⅴ	0.001
2	D_0	1.93	Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ	0.5
3	P	0.5r		
4	τ_1	0.025r		



(a) 布料放大图 (b) 布料浓度加大 (c) 椭圆距离模型

图 6 矩形织纹及其模拟
Fig. 6 Rectangular Weave and It's Simulation

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss6/15
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806015

图 7 为染制结果。染制中使用靛青色进行单色印染。图 7(a)为设计图案，我们选择了传统图案“花”进行染制。该图案由前期制作完成，图 7(b)~(c)中冰纹使用文献[7]算法生成。图 7(b)为 4 次布料扩散结果。此时非盖蜡区染料已基本渗透，该区域内规则的矩形织纹特征较为明显。由于扩散不够充分，斑驳现象虽有体现，仍不明显。盖蜡区与非盖蜡区边界处，颜色的梯度变化已有，但同样不明显，图案较为清晰。图 7(c)为 16 次布料扩散结果，此时扩散较为充分，图案线条及冰纹明显变宽，也出现了明显的斑驳现象。斑驳现象主要出现在边缘处、线条处和冰纹处。盖蜡区与非盖蜡区边界处，颜色的梯度变化比较明显，图案显得模糊、柔软。程序运行速度方面，对于图 7(b)所示效果，它更接近白描图案，但已具有矩形织纹结构特点，4 次布料扩散可以达到要求。对于图 7(c)所示效果，它较为接近实际蜡染视觉特征，具有明显斑驳特点、边缘呈梯度变化，16 次可以达到要求。相较而言，文献[20]中扎染视觉特征的模拟，需经 4 000~32 000 次扩散方可实现。由上可见，我们的算法计算复杂度较文献[20]针对日本扎染的仿真算法小得多。

图 8 为不同线宽布料染制结果。图 8(a)中斑驳现象较为明显，但矩形织纹并不十分明显，图案显得细密。实际蜡染作品中，对于较为紧密、细腻的布料，其染色也会显得较为细腻，可用较小线宽模拟。图 8(c)中矩形织纹较为明显，但斑驳现象并不理想。图 8(b)中斑驳和矩形织纹均有较好的体现。

图 9 为同一图案的不同染制结果。由图 9 可看出，各次染制虽图案相同，但冰纹具有较强的随机性，各不相同。同时，各次染制结果虽风格相同，但细节上并不相同，体现了蜡染作品“一图多样，各图不同”的特点。

(a) 白描图案 (b) 4 次布料扩散结果 (c) 16 次布料扩散结果

图 7 “花”的染制结果
Fig. 7 Dyeing Results of Flower

(a) 线宽为 1 (b) 线宽为 5 (c) 线宽为 15

图 8 不同线宽布料染制结果
Fig. 8 Dyeing Results of Different Thread

图 9 同一图案的不同染制结果
Fig. 9 Different Dyeing Results of Same Pattern

Journal of System Simulation, Vol. 30 [2018], Iss. 6, Art. 15

5 结论

本文提出三层模型结构表示封蜡布，并以此为依据提出考虑染料供给、扩散、吸收的扩散方程。结合封蜡布的封蜡层和扩散方程中的染料供给因素，我们还构建了渗透能力图，用于表示封蜡层对染料的渗透能力。上述模型源于实际布料结构，能较好地表现蜡染作品中布料的斑驳、边缘梯度变化特征。对于布料的矩形排列和绒性特征，本文也在布料单元基础上采用椭圆距离模型和高斯模糊方法进行模拟，取得了较好的效果。在算法计算复杂度方面，我们的算法比日本扎染仿真算法小得多。

由于布料的材质、线型、纺织方法不同，布料的视觉特征也会有所不同。根据给定材质、线型、纺织方法参数，构造布料的视觉特征，可以作为后续的研究。另外，对于织纹绒性更为细节的表示、现有蜡染图案在布料上产业化印染，也值得后续研究。

参考文献:

[1] Lawrence G M. Digital printing and traditional surface design techniques[D]. North Carolina State: Graduate Faculty of North Carolina State University, 2002.

[2] Li D, Yan Y N. Design of Dig-Art Imitating Batik Pattern[J]. Advanced Materials Research (S1662-8985), 2011, 214(2): 260-264.

[3] Wyvill B, Overveld K V, Carpendale S. Rendering cracks in batik[C]// Proceedings of the 3rd international symposium on Non-photorealistic animation and rendering. ACM, 2004: 61-149.

[4] Tang Y, Fang K, Fu S, et al. An improved algorithm for simulating wax-printing patterns[J]. Textile Research Journal (S0040-5175), 2011, 81(14): 1510-1520.

[5] Yu Y, Xu D. Computer-Generated Batik Crack in Real Time[C]// Virtual Reality and Visualization (ICVRV), 2014 International Conference on. IEEE, 2014: 146-153.

[6] 喻扬涛, 徐丹. 蜡染冰纹生成算法研究[J]. 图学学报, 2015, 36(2): 159-165.
Yu Yangtao, Xu Dan. Research on Batik Crack Rendering Algorithm[J]. Journal of Graphics, 2015, 36(2): 159-165.

[7] O'brien J F, Bargteil A W, Hodgins J K. Graphical modeling and animation of ductile fracture[C]// ACM transactions on graphics (TOG). ACM, 2002, 21(3): 291-294.

[8] Su J, Schroeder C, Fedkiw R. Energy stability and fracture for frame rate rigid body simulations[C]// Proceedings of the 2009 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. ACM, 2009: 155-164.

[9] Narain R, Samii A, O'Brien J F. Adaptive Anisotropic Remeshing for Cloth Simulation[J]. Acm Transactions on Graphics (S0730-0301), 2012, 31(6): 147-152.

[10] Umetani N, Kaufman D M, Igarashi T, et al. Sensitive couture for interactive garment modeling and editing[J]. Acm Transactions on Graphics (S0730-0301) , 2011, 30(4): 90-89.

[11] Guan P, Reiss L, Hirshberg D A, et al. DRAPE: DRessing Any PErson[J].Acm Transactions on Graphics (S0730-0301), 2012, 31(4): 351-360.

[12] Narain R, Samii A, O'Brien J F. Adaptive anisotropic remeshing for cloth simulation[J].Acm Transactions on Graphics (S0730-0301), 2012, 31(6): 152-161.

[13] Rudomin I J. Simulating cloth using a mixed geometric-physical method[D]. Pennsylvania: University of Pennsylvania Philadelphia, 1990.

[14] Feng W W, Yu Y, Kim B U. A deformation transformer for real-time cloth animation[J]. Acm Transactions on Graphics (S0730-0301), 2010, 29(4): 157-166.

[15] 石敏, 毛天露, 王兆其. 基于实例数据分析的多精度网格布料动画[J]. 计算机学报, 2015, 38(6): 1296-1306.
Shi Min, Mao Tianlu, Wang Zhaoqi. Multi-Resolution Cloth Based on Animation Instances[J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(6): 1296-1306.

[16] Morimoto Y, Ono K. New cloth modeling for designing dyed patterns[C]// ACM SIGGRAPH ASIA 2010 Posters. ACM, 2010: 11.

[17] 刘世光, 陈国军, 杨鹏, 等. 布料上污渍效果的真实感模拟[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(9): 1110-1116.
Liu Shiguang, Chen Guojun, Yang Peng, et al. Realistic Simulation of Stains on Cloth[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2008, 20(9): 1110-1116.

[18] Fick A. On liquid diffusion[J]. Journal of Membrane Science (S0376-7388), 1995, 100(1): 33-38.

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss6/15
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806015