

计算机辅助绘制黑白唐卡

张荣¹⁾, 施妍²⁾, 彭韧³⁾, 于金辉¹⁾

¹⁾ (浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室 杭州 310058)

²⁾ (杭州电子科技大学数字媒体与艺术设计学院 杭州 310018)

³⁾ (浙江大学计算机科学与技术学院 杭州 310027)

(zrfreya@163.com)

摘要: 唐卡是佛教文化中一种独具特色的绘画艺术形式, 构图复杂、绘制精细, 黑白唐卡是其中一个独特的分支. 针对手工绘制黑白唐卡物体表面的明暗渐变非常耗时耗力的问题, 提出一个计算机辅助绘制黑白唐卡的系统. 首先对输入的唐卡黑白线条图物体区域进行颜色标记; 然后针对区域内部从一条边界向其他边界由暗变亮的物体, 综合区域遮挡关系和几何特征提取线条两侧明暗特征; 再针对区域内部从边界向内部由暗变亮的物体, 通过距离变换或人工交互设置物体灰度控制图像; 最后将明暗特征和控制图像代入泊松方程求解, 得到黑白唐卡中各类物体精细明暗渐变. 文中给出了黑白唐卡的绘制效果.

关键词: 唐卡; 泊松方程; 灰度渐变; 非真实感绘制
中图法分类号: TP391.41

Computer Assisted Rendering of Black and White Thangka

Zhang Rong¹⁾, Shi Yan²⁾, Peng Ren³⁾, and Yu Jinhui¹⁾

¹⁾ (State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

²⁾ (School of Media and Design, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018)

³⁾ (College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: Thangka is a unique form of artistic paintings in Buddhism, depicting a variety of objects and including intricate details. Black and white Thangka is a special branch of Thangka, in which objects are depicted by gray gradient. Manually painting such gray gradient is highly tedious and time consuming. This paper presents a computer assisted system for rendering black and white Thangka. With different objects labelled by using ID colors in the input Thangka line drawings, our system assigns black/white feature points as boundary constraints semi-automatically for regions with gray values increasing/decreasing gradually from one side of the region to another, by taking occlusions and internal geometric features into account. It also takes grayscale images of distance field of object boundaries, or grayscale images drawn manually inside a few regions on human body, as the given brightness distribution for object regions with gray values increasing gradually from the boundaries to the interiors. Black/white feature points and grayscale images are used as constraints to solve Poisson equation to obtain gray gradient corresponding to different objects, as demonstrated by examples in the paper.

收稿日期: 2016-12-02; 修回日期: 2017-05-11. 基金项目: 国家自然科学基金(61379069, 61772463); 国家科技支撑计划(2014BAK09B04); 浙江省自然科学基金(LQ14E050010); 教育部人文社科基金(16YJC760047). 张荣(1991—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为非真实感绘制; 施妍(1989—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为非物质文化遗产保护、交互设计; 彭韧(1968—), 男, 学士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为产品设计、数字媒体等; 于金辉(1960—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为非真实感绘制、计算机动画等.

Key words: Thangka; Poisson equation; gray gradient; non-photorealistic rendering

唐卡(Thangka)是藏传文化中一种独具特色的卷轴画,通常用锦缎装裱后用于悬挂供奉。唐卡最早起源于 2000 多年前的印度帕塔(Patas),之后在尼泊尔得到传承发展,于公元 10 世纪传入西藏地区并广泛流传,逐步发展成独具特色的艺术形式。在漫长的发展历史中,唐卡特征鲜明,内容广泛,其描绘的主题涵盖了西藏占星术、药理学、宗教体系、神明和佛陀、本生经故事等,在宣扬佛教教义的同时也成为记载藏族千年社会生活和历史文化的重要史料。

唐卡作为一种历史悠久的艺术形式,深受藏传佛教的影响,擅长以精致的细节和丰富的色彩来描绘神明等各种佛教元素。作为一种宗教意味极强的艺术作品,唐卡对画面元素的准确性和比例的精确性有很精准的要求。唐卡绘制过程繁杂,对画师的要求极高。经验丰富的唐卡画师一般选择一系列预设好的元素进行组合绘制,包括人物、动物、供品和器皿、自然景物等。根据大小和复杂度的不同,制作一幅完整的唐卡可能需要数月甚至几年时间。

唐卡一般分为 3 类: 1) 彩色唐卡。用彩色颜料绘制,是最常见的一种; 2) 单一颜色的黑卡(黑色背景上用金线绘制)、红卡(红色背景上用金线绘制)和金/银卡(以金/银色铺底,施以红色颜料勾线); 3) 黑白唐卡。即用明暗渐变表现唐卡中的各种物体,如图 1 所示的 2 个例子。



图 1 黑白唐卡

黑白唐卡主要产地在尼泊尔,我国也有少量唐卡画师绘制。由于摒弃各种彩色颜料,黑白唐卡主要通过局部明暗的变化来表现人物形象和物体,在视觉效果上像黑白照片,但大面积背景呈黑色,是唐卡艺术中一个独特的分支。

如果能用计算机辅助绘制黑白唐卡,则可以把大量繁复细致的明暗绘制工作让计算机完成,从而大大降低唐卡画师的手工绘制工作量,提高黑白唐卡的绘制速度,降低黑白唐卡的绘制成本。与手工绘制的黑白唐卡相比,计算机还能够计算生成近乎理想的明暗渐变,从而得到一种新的黑白唐卡绘制风格,为继承和发扬唐卡艺术做出新的贡献。

本文的目标是将黑白线描唐卡图像作为输入,用计算机把输入的线描图绘制成类似图 1 视觉效果的黑白唐卡。为实现这个目标,面临如下挑战:

1) 线描图物体识别。唐卡中物体种类繁多,包含人物(佛、菩萨、度母、神明、大喇嘛等)、云、山、树等,而线描图像中仅有黑、白 2 种像素,无法用现有的照片物体自动识别算法来识别黑白线描图中的不同物体。

2) 物体区域黑白明暗渐变控制。在黑白唐卡中用明暗渐变表现花瓣、叶子、装饰性云和水纹、人物面部和肢体等,此外,明暗渐变还用来表现地表面的纵深感。然而,不同物体明暗的渐变方向和程度都不一样。本文需要根据物体的种类采用自动、半自动和交互方式在不同物体区域上控制明暗渐变方向和程度。

为解决上述问题,本文提出一个计算机辅助绘制黑白唐卡的框架。

1 相关工作

本文工作在广义上属于非真实感图形学绘制(non-photorealistic rendering, NPR)领域,该领域的研究已经有 20 多年的历史,并提出了很多的艺术风格绘制方法。这些方法可以分为两大类:一类是基于三维模型的 NPR,包括在三维模型上绘制不同的艺术效果以及非真实感光照;另一类是基于图像的 NPR,即先输入一个图像(主要是照片),用于提供构图和颜色信息,然后用不同风格的绘制单元如笔刷对输入图像进行绘制,最终得到一个风格化的输出图像,本文工作更接近此类。

1990 年,Haaberli^[1]提出的算法使用不同形状的笔刷将同一幅输入图像绘制出不同的风格化效果。Hertzmann^[2]则通过叠加大小不同的笔刷模拟绘制印象派、表现派等多种流派的艺术作品。2003 年,

徐文华等^[3]提出基于纹理合成的图像艺术风格学习算法, 并成功应用于敦煌壁画的复原临摹中. 2009 年, 黄华等^[4]提出一种不需要人工交互的实时图像素描风格化算法. 赵艳丹等^[5]根据提取的人脸特征, 使用线积分卷积算法将肖像照片绘制成肖像素描. 孙玉红等^[6]则通过形状演化将线条画进行风格转换与变形. 王山东等^[7]设计了几种基于特征流的滤波, 将输入照片转化为抽象线条画. 钱文华等^[8]通过梯度和显著度加权计算图像重要度后, 基于重要度引导绘制抽象艺术风格作品. 宋阳等^[9]分离输入照片的光照图像和材质图像并分别进行编辑后重新叠加, 得到可编辑光照的卡通图像效果.

在我国丰厚的文化底蕴熏陶下, 国内的研究者们也将 NPR 与传统艺术结合, 碰撞出了不一样的火花. 石永鑫等^[10]使用粒子系统模拟仿真中国水墨画效果. 喻扬涛等^[11]、李倩等^[12]、卢丽稳等^[13]分别用计算机模拟生成西南地区蜡染冰纹、云南绝版套刻版画和云南重彩画人物肖像效果. 丁孝强等^[14]通过计算机辅助绘制中国传统工笔人物画效果.

本文中最重要的重要的明暗渐变过程通过求解泊松方程的方式得到. 泊松方程广泛应用于计算机图形图像领域. 2003 年, Pérez 等^[15]将泊松方程用于图像编辑, 如图片的无缝拼接、局部区域颜色调整、光照改变等. 2013 年, Orzan 等^[16]提出了平滑色彩渐变图片的 Diffusion curve 矢量图表示方法, 其主要思想是交互地指定物体边界线以及对应的颜色, 或者在照片上提取物体特征位置和颜色信息; 然后求解泊松方程进行扩散, 并添加模糊效果来生成一种渐变绘画效果或者重建图片. Takayama 等^[17]将文献[16]的思想运用到三维层面, 提出用 Diffusion surface 建立 3D 实体模型的方法. Sýkora 等^[18]通过求解泊松方程模拟三维效果来为手绘卡通动画映射纹理. Sun 等^[19]将 Diffusion curve 扩展为 Diffusion curve texture 用于纹理映射, 并很好地保持了纹理细节.

对于 Diffusion curve 的扩散求解, 也有一系列方法被提出. Jeschke 等^[20]为 Diffusion curve 和泊松图像编辑提出一种 GPU 拉普拉斯求解方法, 提高了求解效率. Bowers 等^[21]将光线跟踪的思想引入扩散过程中, 对每一个像素通过随机光线跟踪集成其视觉贡献来求解其对应颜色, 该方法具备更好的扩展灵活性. Pang 等^[22]通过 Delaunay 三角化达到快速求解扩散的目的. Sun 等^[23]则提出 Diffu-

sion curve 和 Diffusion point 的快速多极化表示, 并据此生成了震撼逼真的星空艺术效果.

Diffusion curve 方法虽然可以生成颜色渐变效果, 但在 NPR 中应用该方法时需要用户画出对应物体前景和背景的 2 条紧紧相邻的种子曲线, 然后用户指定背景种子曲线颜色以及前景曲线上端点的颜色, 系统对端点颜色插值后得到颜色渐变的前景种子曲线. 该方法在表现人物面部的局部高亮或者阴暗效果时还需要用户画出特别的辅助区域边线并指定其颜色, 这些交互操作对用户的艺术素养要求很高. 本文中将黑白线描唐卡图像作为输入, 因而不需要用户画出繁复的各种唐卡物体以及细节, 也不需要用户指定种子曲线颜色信息.

Diffusion curve 方法在指定物体种子曲线位置和颜色后, 通过多重网格算法求解拉普拉斯方程 ($\nabla^2 G = 0$, 泊松方程的一种特殊情况) 得到颜色渐变, 这种处理方式无法正确再现黑白唐卡中人物面部、躯干以及四肢由边界向内部由暗变亮的趋势. 本文采用泊松方程一般形式 ($\nabla^2 G = f(x, y)$, $f(x, y) = 0/1$ 或赋予其他函数), 通过不同的 $f(x, y)$ 约束生成符合黑白唐卡特点的明暗渐变(详见第 6 节).

2 本文系统概述

已有的 NPR 方法主要采用点、线段(包括直线段或曲线段)、笔刷等离散绘制元素绘制物体. 在用点的时候, 由于点没有方向, 故用点的疏密变化表现物体的明暗. 在用线段时, 因线段有长度、方向, 故可根据物体结构确定线段的方向, 并用线段疏密变化来表现物体的明暗. 笔刷是在线段基础上再加上宽度, 根据施加到笔刷上的力量、笔刷的材料和染料特性不同, 笔刷宽度和形状有所变化, 在笔刷区域内还可能伴有笔刷纹理. 在 NPR 技术中, 可以对笔刷的形状、大小、方向以及颜色纹理进行控制来绘制出不同风格的物体; 但是在尼泊尔黑白唐卡中物体表面没有明显的笔触, 上述用点、线段以及笔刷的 NPR 绘制方法不适用尼泊尔黑白唐卡. 因此, 本文根据尼泊尔黑白唐卡的视觉效果, 提出用泊松方程扩散绘制尼泊尔风格的黑白唐卡物体表面效果.

在传统唐卡制作过程中, 画师先在木制板框架上铺展开一块画布, 然后在其上画出一些引导用的线条展示构图. 由于唐卡中的佛教人物都有

规定的姿势和比例, 故画师会根据规定粗略地画出人物形象, 并绘制山峦、云朵等物体轮廓, 经过细致的调整后得到唐卡线描图; 再在各种物体区域上绘制出明暗渐变并添加细节图案(如衣服上的饰纹等); 最后描绘最重要的部分, 即人物脸部作为点睛之笔. 接下来画师把木质板框架移除, 并将画布固定到锦缎上, 在锦缎的两端插上木棍后得到可以悬挂的唐卡.

参考手工黑白唐卡绘制过程, 本文的计算机辅助绘制黑白唐卡系统流程如图 2 所示. 在研究伊始, 本文作者访问了青海民族大学唐卡专业, 有幸获得唐卡艺术大师夏吾才让先生惠赠的藏文唐卡教科书, 里面印有多幅唐卡的黑白线描图. 本文系统将唐卡线描图作为输入, 经过初步预处理后使用预设的色彩填充各个区域进行物体的标记, 并将标记后的物体分为 2 类; 根据分类, 控制生成不同的图像(灰度控制图、边界黑白特征约束图像)代入泊松方程, 通过 GPU 迭代求解计算, 生成明暗渐变; 最终调整合成得到具有合理视觉效果的黑白唐卡.



图 2 本文系统框图

3 预处理

本文系统以唐卡线描图作为输入, 为了满足后续计算需要, 首先进行若干预处理操作, 主要步骤如下:

Step1. 线条的填补. 由于唐卡线描图原图为手工绘制作品, 经过扫描后会出现一些大大小小的缝隙和缺块, 需要用 Photoshop 等工具对其进行填补操作.

Step2. 线条的单像素化. 对线条进行细化, 抽出线描图像骨骼并进行微调, 得到八邻域连通的单像素线描图.

Step3. 佛像发髻的添加. 在某些唐卡黑白线描图

中只画出头发区域的轮廓, 没有内部细节; 但佛像头发是狮子头, 即有很多大小不同的圆圈. 本文在头发轮廓内部通过插值生成大小合适的圆圈来模拟佛像的发髻, 通过调整圆圈的半径和位置得到视觉合理的效果.

4 物体区域颜色标记

唐卡中人物的绘制需要遵循严格的规定, 但允许画师选择合适的物体进行整体构图, 人物的衣服纹饰也可以变化. 本文选取唐卡作品中比较有代表性的 3 个人物线描图, 分别是释迦牟尼佛、度母和四臂观音; 然后在藏文唐卡教科书中选取一些物体, 按照尼泊尔黑白唐卡的特点进行构图.

鉴于唐卡线描图既包含人物又包含多种物体, 识别各个物体成为进行后续工作必不可少的一部分. 黑白线描图只有黑、白 2 种像素, 目前无法从复杂的唐卡线描图中自动识别出各个物体. 为了解决这个问题, 本文事先定义好各种物体对应的颜色, 然后用交互方式对不同物体区域填充相应的颜色, 采取传统的漫水填充(flood fill)算法实施颜色填充(如图 3b 所示). 考虑到有些区域如衣物、莲台等有多组封闭区域连接构成, 对每个封闭区域单独交互过于烦琐. 本文提供一个交互工具: 用户只需用鼠标在相关封闭区域上穿越运动, 系统捕捉用户鼠标移动轨迹并将其作为种子点, 进而实现对属于同一类物体的多个封闭区域内的颜色填充. 在填充所有区域后, 系统通过扫描各个区域内的颜色来识别出具体物体.



a. 释迦牟尼佛线描图

b. 颜色标记结果

图 3 释迦牟尼佛线描图及物体区域颜色标记结果

本文将颜色标记后的物体分为两大类:

1) 与人物肢体有关的区域, 如胸膛、手臂以及珠子等小尺寸装饰物. 本文用灰度控制图像进行初始控制, 然后用泊松方程求解得到精细明暗

渐变.

2) 衣服、山峦、云朵等物体. 本文用半自动或交互方式对其赋予黑白像素种子以约束泊松方程边界特征, 然后用泊松方程求解得到精细明暗渐变.

5 泊松方程

对于一个封闭区域 R_i , 其边界为 B_i , 在 Dirichlet 边界约束下的二维泊松方程一般定义为

$$\begin{cases} \nabla^2(x, y) = f(x, y), & \text{if } (x, y) \in R_i \\ u(x, y) = c, & \text{if } (x, y) \in B_i \end{cases} \quad (1)$$

其中, $u(x, y)$ 为方程的解, 本文中代表图像上像素点的灰度; c 是边界上的约束值, 本文中取值为 0 或 1. $f(x, y)$ 是已知函数, 对于第 4 节中提到的 2 类不同区域, 代入不同的 $f(x, y)$ 求解, 对于第 1 类需要表现隆起的区域, 可将 $f(x, y)$ 简单地赋值为常数, 也可为其赋予不同的图像(称为灰度控制图, 见第 6 节); 对第 2 类区域, 直接令 $f(x, y)=0$, 此时式(1)即为拉普拉斯方程.

在笛卡儿网格下, 本文用二阶有限差分的形式近似计算式(1), 可得到

$$\frac{u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j}}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j-1} - 2u_{i,j} + u_{i,j+1}}{\Delta y^2} = f_{i,j}.$$

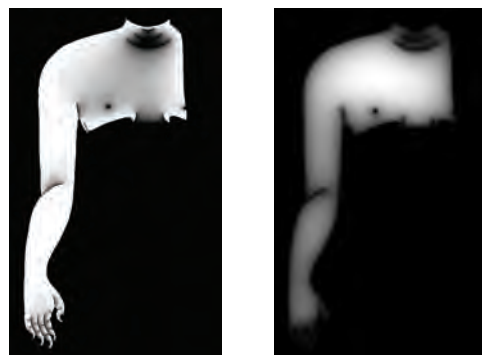
该差分方程可以进一步推导后通过 Jacobi 迭代求解. 将区域轮廓图像作为方程的初始估计, 用 Jacobi 迭代逐步将边界点灰度值向区域内部扩散, 直到计算的明暗分布达到预定的均衡状态为止. 本文设定迭代终止阈值、间隔次数和最大迭代次数 3 个参数用于检查计算是否到达均衡状态. 为减少计算量, 提高计算效率, 每隔一定间隔次数对当前解进行检查. 如果当前解与上次检查解之间各个点的差值小于终止阈值, 则认为迭代已达到均衡, 当前解即作为最终解; 否则迭代在进行最大迭代次数后自动终止.

本文通过将 Jacobi 迭代的过程写入 GPU 着色器来加速迭代, 加速后, 对于 300 万左右像素的唐卡图像中各个区域的求解基本上能在数秒内完成.

区域 R_i 的明暗渐变结果与 $f(x, y)$ 和边界约束值 c 有关. c 均为 0(输入图像的轮廓边界作为边界约束)、 $f(x, y)=1$ 时, 区域纵深越大处亮度越高; c 取 0 或 1(通过添加种子点给定边界约束)、 $f(x, y)=0$ 时, 纵深越大灰度变化越平缓.

6 灰度控制图

在黑白唐卡与人物肢体有关的区域, 如胸膛、手臂、手背、手指等, 如果用 Diffusion curve 方法直接求解拉普拉斯方程(式(1)中 $f(x, y)=0$)得到的是从一条边界向另一条边界明暗过渡的效果, 如图 4a 所示. 可以看出, 图中手臂非常明亮, 胸膛部分比较暗, 这是不合理的. 解决问题的方法是令式(1)中 $f(x, y)=1$, 得到图 4b 所示的效果, 可以看出, 胳膊部分从边缘到内逐渐变亮, 正确地表现出了肌肉的隆起效果. 图 4b 的缺点是区域最宽处(如图 4b 中胸部上方)亮度过高, 最窄处(如手指)亮度过暗, 这么黑的手指在视觉效果上也是不合理的.



a. Diffusion curve 方法 b. $f(x, y)=1$ 的结果

图 4 不同方法生成的胸膛手臂区域渐变

实际上, 黑白唐卡在视觉效果上与黑白照片类似, 即手指、手臂和胸膛的亮度大致相当才比较合理. 为此需要把整个区域亮度进行均衡处理, 即把胸膛区域的亮度降低, 把手臂和手指的亮度提高. 又因式(1)中 $f(x, y)$ 取非常数值时对最终扩散结果有影响, 本文提出 2 种方法来对该区域进行整体调控.

1) 距离变换场. 一个封闭区域的距离变换场是用灰度值标记区域内部每一个点到最近的轮廓点的距离. 对该区域进行计算得到灰度图, 然后将其黑白反转得到反相距离场灰度图(如图 5a 所示). 把该图灰度值赋到式(1)的 $f(x, y)$ 中求解得到渐变结果(如图 5b 所示), 手臂和手指亮度相对于图 4b 有所提高, 但仍然未达到视觉合理的程度.

2) 人工交互涂抹手臂部分得到图 5c, 对其做距离变换操作(如图 5e 所示); 再用白色涂抹手指部分得到图 5d. 将图 5c 的距离变换结果与图 5a, 5d 叠加, 得到所需的灰度控制图像(如图 5e 所示), 将该图的灰度值赋到式(1)的 $f(x, y)$ 中求解后可以

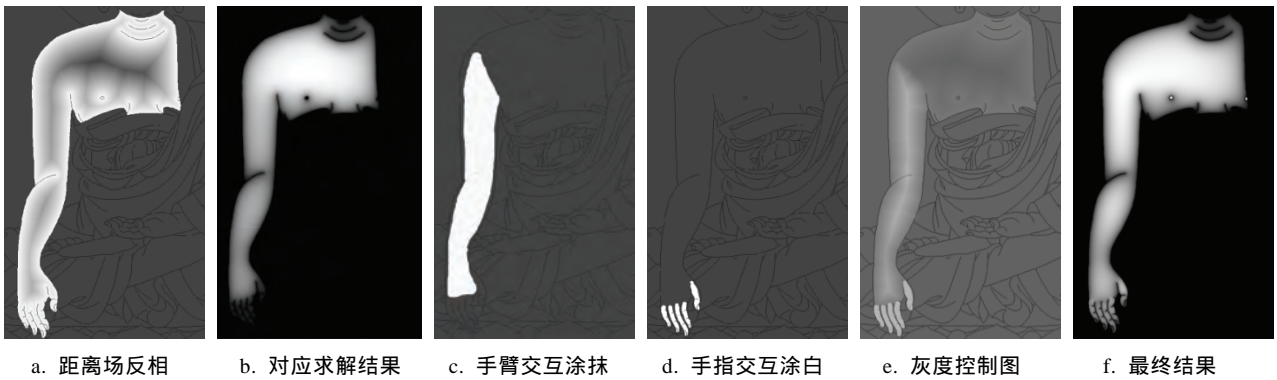


图 5 各类灰度控制图及对应求解结果

得到如图 5f 所示的最终结果. 由图 5f 可见, 手指、手臂、胸膛部分亮度在视觉效果上趋于合理. 本文把图 5e 称为灰度控制图, 用其初步控制整体区域的明暗渐变结果.

除了人物肢体区域外, 尺寸比较小、形状简单的物体, 如观音和度母佩戴的装饰物以及水果供品等, 可把 $f(x, y)=1$ 的灰度控制图直接代入式(1)计算即可得到理想的明暗渐变效果.

7 泊松方程边界特征约束

对于第 4 节中的第 2 类物体, 如衣服、山峦、云朵等, 本文需要确定其线条两侧的明暗属性并添加特征种子点作为泊松方程的边界约束. 特征种子点有 2 种: 黑色种子点(灰度值为 0), 对应明暗的最暗处, 可直接用线描图上的黑色像素点代替; 白色种子点(灰度值为 1), 对应明暗的最亮处.

7.1 衣服区域处理

唐卡人物穿着的衣服所占区域比较大, 用于表现衣服褶皱的线条多, 它们以曲线形式表现衣服下垂以及和身体接触形成的起伏和遮挡关系. 本文需要确定衣服区域内的遮挡关系, 并对衣褶线条进行特征检测, 最后综合其遮挡关系和衣褶几何特征来确定各个线条两侧的明暗属性并添加特征种子点.

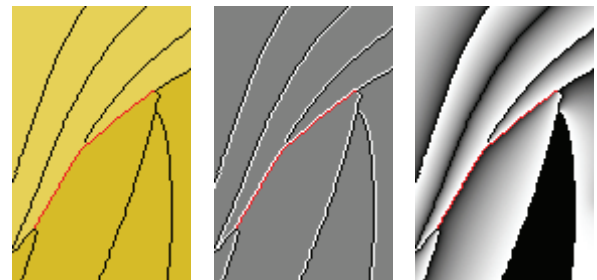
在我们早期的工笔画绘制工作^[14]中, 曾提出工笔画衣服表面 T 形交叉和局部弯曲较大的 U 形线条明暗侧的检测方法. T 交叉是指有 3 条分支的交叉点, 由交叉点出发在一定范围内检测其 3 个分支, 形成最大夹角的 2 条分支被看成 T 形上的横线条; 该横线条上含有第 3 条分支的一侧赋予黑色种子点, 而在分支线条上随机选取一侧赋黑色种子

点. U 形线条在凹的一侧添加黑色种子点. 然而唐卡衣服在有的地方存在遮挡关系, 由于文献[14]的方法没有考虑遮挡关系, 因此有时添加种子点会出现错误. 本文从如下 2 点改进衣纹种子点赋值算法:

1) 衣服区域遮挡关系的处理. 因为在黑白线描图中识别遮挡关系极为困难, 所以本文在相关区域交互添加深浅颜色来标记区域间的大致遮挡关系. 如图 6a 所示, 颜色较深的区域被较浅的区域遮挡; 图 6b 所示是图 6a 中红色框中飘带的局部细节, 对于处在 2 个深浅颜色交界处的线条(如图 6b 中的红线), 系统在该线条浅色一侧自动添加白色种子(如图 6c 所示), 图 6d 展示了对应的明暗渐变求解结果.



a. 衣服整体遮挡关系



b. 局部遮挡

c. 种子点

d. 渐变结果

图 6 遮挡关系、种子点添加及求解结果

2) 被同一种颜色标记的同一个小区域上的线条. 对于既非 T 交叉也非局部弯曲较大的 U 形的其他曲线, 文献[14]算法随机地在其一侧添加种子点. 在唐卡中此类线条凹面较亮的可能大于凸面, 据此以较大概率在线条凹侧添加白色种子点.

在系统执行期间, 先根据物体区域颜色标记图寻找到衣服区域, 综合遮挡关系和几何特征信息添加特征种子点, 得到整个区域(如图 6b 标记的深棕绿色部分)的泊松方程边界黑白特征约束, 并将其代入式(1)计算得到整个衣服区域的明暗渐变.

7.2 其他区域处理

对于唐卡中的山峦、云朵以及人物脸部五官等部分, 因其线条凸凹变化和交叉等交织在一起, 难以找到自动方法确定黑白种子. 然而这类区域内线条数量较少, 用户可用系统提供的交互工具在需要添加种子点的一侧单次点击鼠标, 系统将该点作为基准点, 自动获取最近的线条并沿点击点一侧添加白色特征种子点; 也可以根据几何特征自动进行种子点的添加(线条凹侧添加白色种子点). 对于自动添加种子点出现的少数不合理结果, 用户也可以点击右键取消错误种子点, 并重新在正确一侧点击鼠标添加种子点.

添加种子点完毕后可以得到相关区域的边界黑白特征约束, 将其代入式(1)求解就能够得到对应区域的明暗渐变.

8 绘制结果

唐卡风格主要体现在 2 个方面: 一是唐卡构图, 即唐卡人物和其他物体的形状描绘以及它们的空间位置安排; 二是物体表面的颜色或者灰度绘制.

在构图方面, 唐卡的人物姿势和比例是严格规定的, 不能变化, 但人物的衣服纹饰可以变化. 唐卡背景物体可以根据构图需要选择并安排到唐卡画面合适位置上. 尼泊尔黑白唐卡与彩色唐卡相比在构图上有明显的不同, 因为不使用丰富的颜色, 尼泊尔黑白唐卡不像彩色唐卡用不同物体充满整个画面, 而是留出较大的黑色背景. 为在构图上与手绘唐卡保持一致, 本文在已有唐卡黑白线描图中^[24-25]选取合适的物体, 按照尼泊尔黑白唐卡的构图特点构建了 3 幅唐卡黑白线描图, 图中的人物分别为释迦牟尼佛、度母、四臂观音; 其中, 释迦牟尼佛唐卡分辨率为 2009×2516 , 度母唐卡分辨率为 1736×2272 , 四臂观音分辨率为 1687×2276 .

由于唐卡作品物体种类繁多, 对应的区域复杂, 难以做到全部自动化. 本文中需要的交互主要有 3 种: 1) 交互使用漫水填充算法进行区域颜色标记; 2) 对于衣物区域, 交互划定区域的遮挡关系, 从而增加自动添加种子点的正确率; 3) 对于自动添加的少量不合理的种子点, 交互进行修改. 本文系统中提供了相应的工具来帮助用户方便地进行交互. 图 7d~7f 中用不同颜色的来标注不同区域需要的交互操作, 其中, 粉色代表只需要区域颜色标记, 黄色需要区域颜色标记并对自动添加的种子点进行少量交互修改, 而蓝色区域则需要全部 3 种交互操作.



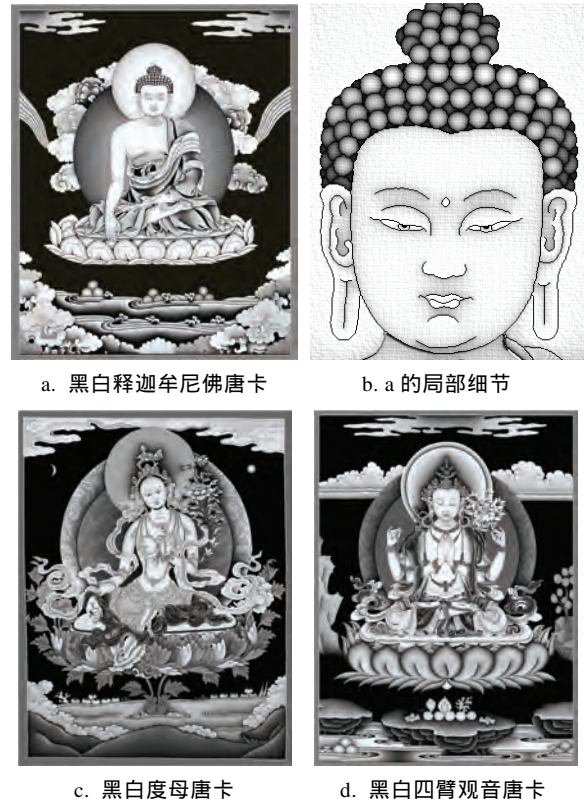
图 7 释迦牟尼佛、度母和四臂观音线描图和需要的交互操作区域图

与手绘唐卡黑白渐变绘制的繁复过程不同,对于物体表面的颜色或者灰度绘制,本文采用泊松方程计算灰度扩散来绘制唐卡物体的渐变效果,大大提高了物体表面明暗的绘制效率.同时,用计算机绘制的黑白渐变效果非常光滑,接近理想均匀渐变,因而超越了手工绘制的灰度渐变效果.

在手工黑白唐卡中,画师为了突出人物将其画得比背景更明亮,对莲台、云朵等不同物体则大致按其质感用不同明暗来表现,还可进一步在衣物上添加纹理细节.据此,本文在计算各个区域明暗渐变之后,可根据物体区域颜色标记图对相应区域进行灰度整体控制、黑白纹理叠加.最后,为了使得最终生成的黑白唐卡在视觉效果上更加自然,添加了一定的高斯噪声来丰富高频细节.考虑到唐卡是在布料上绘画的,本文还叠加了布纹理,如图 8 所示.

本文系统的实验平台为 Core i5-4590 3.30 GHz 处理器, GTX970 GPU, 8 GB 内存, 迭代终止阈值为 0.01、检查间隔次数为 500、最大迭代次数为 200 000.表 1 所示为释迦牟尼佛唐卡图中主要区域的包围盒大小、泊松方程边界特征约束、灰度控制图、求解泊松方程迭代次数、迭代时间以及每一部分交互所需时间.可以看出,本文用 GPU 加速计算泊松方程的时间花销还是很小的.因此,用本文系统辅助绘制黑白唐卡可以大大降低绘制各种物体所需时

间,从而将手工黑白唐卡绘制时间从数周甚至数月缩减到几个小时.



a. 黑白释迦牟尼佛唐卡

b. a 的局部细节

c. 黑白度母唐卡

d. 黑白四臂观音唐卡

图 8 黑白释迦牟尼佛唐卡、黑白度母唐卡和黑白四臂观音唐卡

表 1 释迦牟尼佛唐卡部分区域在对应参数下的明暗渐变计算相关数据

区域	分辨率	边界约束	$f(x, y)$	迭代次数	迭代时间/s	交互时间/min
释迦牟尼佛衣服	1467 × 875	有	黑色	9981	2.769	4.5
释迦牟尼佛莲台	1503 × 366	有	黑色	4492	0.858	3
释迦牟尼佛左手	250 × 71	无	反相距离场交互叠加	6987	0.234	1
释迦牟尼佛脸部	261 × 231	有	黑色	4991	0.255	1
释迦牟尼佛左侧背光	406 × 850	有	黑色	13474	1.337	0.5
释迦牟尼佛贡果	153 × 119	无	白色	9482	0.311	0.25
释迦牟尼佛顶光	590 × 546	有	黑色	14971	1.521	0.4
释迦牟尼佛胸膛	451 × 911	无	叠加(图 5e)	111777	10.158	2.5

9 结 语

本文提出一个计算机辅助绘制黑白唐卡系统,可以将唐卡画师对不同物体明暗渐变的烦琐、精细绘制劳动转化为物体颜色分类标记、灰度控制图像和边界约束图像生成、泊松方程计算求解等,大大降低了黑白唐卡的绘制时间.虽然手工黑白唐卡因画师艺术造诣高、花费劳动多而使得画出的作品具有很高的艺术价值,但与手工绘制相比,计算机

生成的黑白唐卡可以得到理想均匀的黑白渐变,绘制出一种新风格的黑白唐卡,对唐卡艺术的传承做出新的贡献.在未来工作中,我们将以彩色唐卡为对象,研究其绘制方法,包括基于机器学习的颜色自动化绘制、纹理映射等.

参考文献(References):

- [1] Haeberli P. Paint by numbers: Abstract image representations[C]

- //Proceedings of the 17th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 1990: 207-214
- [2] Hertzmann A. Painterly rendering with curved brush strokes of multiple sizes[C] //Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 1998: 453-460
- [3] Xu Wenhua, Wei Baogang, Pan Yunhe. Learning of image rendering style based on texture synthesis[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(3): 115-119(in Chinese)
(徐文华, 魏宝刚, 潘云鹤. 基于纹理合成的图像艺术风格学习[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2003, 36(3): 115-119)
- [4] Huang Hua, Cheng Wei. Real-time image sketch[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(10): 2023-2029(in Chinese)
(黄 华, 程 威. 实时图像素描风格化[J]. 计算机学报, 2009, 32(10): 2023-2029)
- [5] Zhao Yandan, Zhao Hanli, Xu Jiayi, *et al.* Portrait drawing generation based on facial features and line integral convolution[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(10): 1711-1719(in Chinese)
(赵艳丹, 赵汉理, 许佳奕, 等. 基于人脸特征和线积分卷积的肖像素描生成[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(10): 1711-1719)
- [6] Sun Yuhong, Tu Changhe, Meng Xiangxu. Evolution-based style transformation and deformation for line drawings[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(2): 208-211(in Chinese)
(孙玉红, 屠长河, 孟祥旭. 基于形状演化的线条画风格转换与变形[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(2): 208-211)
- [7] Wang Shandong, Liu Xuehui, Chen Yanyun, *et al.* Abstract line drawing from photographs using flow-based filters[J]. Chinese Journal of Computers, 2014, 37(3): 611-620(in Chinese)
(王山东, 刘学慧, 陈彦云, 等. 基于特征流的抽象线条画绘制[J]. 计算机学报, 2014, 37(3): 611-620)
- [8] Qian Wenhua, Xu Dan, Yue Kun, *et al.* Sketch artistic rendering based on significance map[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(5): 915-923(in Chinese)
(钱文华, 徐 丹, 岳 昆, 等. 重要度引导的抽象艺术风格绘制[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(5): 915-923)
- [9] Song Yang, Liu Yanli. An algorithm generating human face cartoon portrait including light editing based on photo[J]. Journal of Graphics, 2015, 36(1): 83-89(in Chinese)
(宋 阳, 刘艳丽. 基于照片的可编辑光照效果卡通人脸生成算法[J]. 图学学报, 2015, 36(1): 83-89)
- [10] Shi Yongxin, Sun Jizhou, Zhang Haijiang, *et al.* Graphical simulation algorithm for Chinese ink wash drawing by particle system[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2003, 15(6): 667-672(in Chinese)
(石永鑫, 孙济洲, 张海江, 等. 基于粒子系统的中国水墨画仿真算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(6): 667-672)
- [11] Yu Yangtao, Xu Dan. Research on batik crack rendering algorithm[J]. Journal of Graphics, 2015, 36(2): 159-165(in Chinese)
(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)
- [12] Li Qian, Xie Wanyu, Li Yurun, *et al.* The initial research on the digital simulation and synthesis of Yunnan out-of-print woodcuts[J]. Journal of Graphics, 2013, 34(3): 120-125(in Chinese)
(李 倩, 解婉誉, 李玉润, 等. 云南绝版套刻版画的数字模拟合成技术研究[J]. 图学学报, 2013, 34(3): 120-125)
- [13] Lu Liwen, Pu Yuanyuan, Liu Yuqing, *et al.* A portrait generation algorithm of Yunnan heavy color painting[J]. Journal of Graphics, 2013, 34(3): 126-133(in Chinese)
(卢丽稳, 普园媛, 刘玉清, 等. 云南重彩画人脸肖像生成算法[J]. 图学学报, 2013, 34(3): 126-133)
- [14] Ding Xiaoqiang, Hu Taocheng, Peng Ren, *et al.* Computer-aided rendering of chinese meticulous figure paintings[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(7): 1189-1195(in Chinese)
(丁孝强, 胡桃成, 彭 韧, 等. 计算机辅助绘制工笔人物画效果[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(7): 1189-1195)
- [15] Pérez P, Gangnet M, Blake A. Poisson image editing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 313-318
- [16] Orzan A, Bousseau A, Barla P, *et al.* Diffusion curves: a vector representation for smooth-shaded images[J]. Communications of the ACM, 2013, 56(7): 101-108
- [17] Takayama K, Sorkine O, Nealen A, *et al.* Volumetric modeling with diffusion surfaces[J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(6): Article No.180
- [18] Sýkora D, Ben-Chen M, Čadík M, *et al.* TexToons: practical texture mapping for hand-drawn cartoon animations[C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2011: 75-84
- [19] Sun X, Xie G F, Dong Y, *et al.* Diffusion curve textures for resolution independent texture mapping[J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4): Article No.74
- [20] Jeschke S, Cline D, Wonka P. A GPU Laplacian solver for diffusion curves and Poisson image editing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(5): Article No.116
- [21] Bowers J C, Leahey J, Wang R. A ray tracing approach to diffusion curves[C] //Proceedings of the 22nd Eurographics Conference on Rendering. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2011: 1345-1352
- [22] Pang W M, Qin J, Cohen M, *et al.* Fast rendering of diffusion curves with triangles[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2012, 32(4): 68-78
- [23] Sun T, Thamjaroenporn P, Zheng C X. Fast multipole representation of diffusion curves and points[J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(4): Article No.53
- [24] He Zhong. Appreciation of classic Tibetan Duo-school Thangka[M]. Beijing: China Nationality Art Photograph Publishing House, 2011(in Chinese)
(贺 中. 西藏多派唐卡经典鉴赏[M]. 北京: 中国民族摄影艺术出版社, 2011)
- [25] Konchoktenzin, *et al.* Dege scripture printing monastery Tibetan woodblock paintings[M]. Chengdu: Sichuan Minorities Press, 2002(in Chinese)
(更秋登子, 等. 德格印经院藏传木刻版画集[M]. 成都: 四川民族出版社, 2002)