



# 用线描图生成唐卡浮雕

夏梦<sup>1</sup>, 张荣<sup>1</sup>, 彭韧<sup>3</sup>, 于金辉<sup>1,2\*</sup>

1. 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310058

2. 哈尔滨金融学院计算机系, 哈尔滨 150030

3. 浙江大学计算机科学与技术学院, 杭州 310027

\* 通信作者. E-mail: jhyu@cad.zju.edu.cn

收稿日期: 2018-07-29; 接受日期: 2018-10-18; 网络出版日期: 2019-02-15

国家自然科学基金 (批准号: 61772463) 资助项目

**摘要** 与基于三维模型和照片生成浮雕的技术相比, 黑白线描图中没有物体的三维信息, 因此用黑白线描图辅助生成浮雕面临新的研究挑战. 本文面向非物质文化遗产唐卡, 提出一个用黑白线描图生成唐卡浮雕的方法. 本文主要贡献是用物体区域的灰度控制图以及边界种子作为约束求解 Poisson 方程得到物体浮雕表面高度. 具体将浮雕模型分为低频、中频和高频 3 个分量. 低频分量指线描图中人物躯干以及四肢在衣服覆盖下形成的隆起趋势, 中频分量指线描图中人物的四肢局部隆起, 这两部分的高度用距离变换约束的 Poisson 扩散获得. 高频分量指物体的细节, 例如人的眉毛、背景中的云、山、花瓣, 以及饰品等, 它们的高度通过边界约束的 Poisson 扩散生成. 最后将浮雕低频分量、中频分量和高频分量的高度图叠加并将其转换成面片模型获得完整浮雕模型. 文中给出的图例验证了我们方法的有效性.

**关键词** 非物质文化遗产, 唐卡, 线描图, Poisson 扩散, 浮雕

## 1 引言

唐卡最早起源于两千多年前的印度帕塔, 然后在尼泊尔得到传承发展, 公元 10 世纪传入我国西藏地区, 逐步发展成独具特色的宗教艺术. 唐卡有多种表现形式, 最常见的是画在卷轴上的唐卡, 此外还有刺绣唐卡、提花唐卡、堆绣唐卡, 以及浮雕唐卡. 在 2006 年和 2009 年我国政府和联合国教科文组织分别将唐卡列为非物质文化遗产.

唐卡的艺术特点是用精致的细节和复杂的构图来表现人物、动物、供品、器皿, 以及自然景物, 因而唐卡绘制过程繁杂. 根据画幅大小和构图复杂度的不同, 绘画一幅完整的唐卡可能需要数月时间, 而雕刻一块唐卡浮雕则需要一年甚至更多时间. 如果能用计算机辅助生成浮雕唐卡模型, 则可用浮雕机或 3D 打印机制作浮雕, 从而大大提高唐卡浮雕制作效率. 我们的目标是用唐卡黑白线描图生成三

**引用格式:** 夏梦, 张荣, 彭韧, 等. 用线描图生成唐卡浮雕. 中国科学: 信息科学, 2019, 49: 216–228, doi: 10.1360/N112018-00198  
Xia M, Zhang R, Peng R, et al. Generation of Thangka relief from line drawings (in Chinese). Sci Sin Inform, 2019, 49: 216–228, doi: 10.1360/N112018-00198

维浮雕模型, 实现这个目标有如下研究挑战: (1) 线描图物体识别. 唐卡中物体种类繁多, 其中人物包括佛、菩萨、度母、金刚等, 此外还有云、山、水、植物等各种物体, 因线描图像中仅有黑白两种像素, 无法用现有的照片物体识别算法来识别黑白线描图中的不同物体. (2) 物体浮雕高度生成与控制. 在浮雕唐卡中用高度变化表现人物面部、肢体、花瓣、树叶、装饰性云朵和水纹等, 然而这些不同物体的浮雕高度变化规律都不一样. 我们需要根据物体的种类采用自动、半自动和交互方式在线描图中不同物体区域上控制其浮雕高度变化.

本文提出一个用唐卡线描图生成浮雕模型的方法, 在详细介绍我们方法之前先回顾一下相关工作.

## 2 相关工作

现有计算机辅助生成浮雕方法主要分为两类, 一类是基于三维模型的, 另一类是基于图像的<sup>[1]</sup>.

在第 1 类方法中, 最早是 Cignoni 等<sup>[2]</sup> 把三维建筑模型在视点平面方向压缩模型深度来获得浮雕效果, 其缺点是经过压缩后在最终浮雕表面难以看清物体细微深度变化. 受到浮雕和高动态图像把光亮范围压缩并保持阴影和亮处细节技术的启发<sup>[3]</sup>, 一些学者用三维模型的深度代替光亮度并对其进行压缩来生成浮雕效果<sup>[4~9]</sup>. Song 等<sup>[10]</sup> 将网格显示度、形状夸张, 以及网格离散微分坐标结合起来, 提出一个保持原有三维形状特征的浮雕算法. Kerber 等<sup>[11,12]</sup> 把三维模型投影到视平面上得到一幅图像, 然后用不同的二值模板在该图像梯度域上识别属于深度场的模型特征像素, 可以保留因统一压缩高度场而丢失的细节. Bian 和 Hu<sup>[13]</sup> 将 Laplacian 坐标和非线性压缩梯度域相结合, 提出一个保持细节特征的浅浮雕建模方法. Wang 等<sup>[14]</sup> 将三维场景中提取的线条信息转化为雕刻笔画, 并用其绘制风格化的凹线形象. Miao 等<sup>[15]</sup> 则将线画图案刻画在三维模型表面上. Zhang 等<sup>[16]</sup> 提出模拟给定光照条件下生成具有不同视觉效果浅浮雕方法. Li 等<sup>[17]</sup> 提出一个基于 3D 网格频域分析的浅浮雕算法. 还有人考虑视觉显著性, 先计算三维模型最佳视角, 然后根据前浮雕面积与变形准则优化求解浮雕位置参数<sup>[18]</sup>. Wu 等<sup>[19]</sup> 提出一个基于凹凸贴图的浮雕网格的 3D 打印自适应细分切片算法, 将凹凸贴图表示的浮雕模型直接进行切片完成打印.

在第 2 类方法中, Alexa 等<sup>[20]</sup> 在给定具有已知光照方向的图像条件下, 生成浮雕曲面在同样光照下其漫反射接近给定的图像. 为了恢复画像砖和画像石上的浮雕表面, Li 等<sup>[21]</sup> 从画像砖和画像石拓片黑白图像中提取中轴用于构建基本曲面, 再结合拓片中的细节来构建浮雕表面. Meng 等<sup>[22]</sup> 利用 Shape-from-Shading 方法估计浮雕模型的深度矩阵, 再过滤波变换和模型叠加对矩阵进行修复, 重建出受到侵蚀与损坏的文物浮雕表面. 在交互构建浮雕模型研究中, Wu 等<sup>[23]</sup> 开发一个交互系统, 用户在一个视角下画出一个 2D 形状, 然后在画板中选用相应的 3D 画笔将开始画的 2D 形状的 3D 朝向表现出来. Sýkora 等<sup>[24]</sup> 在手绘卡通形象上加上表示分块和深度层注释, 绘制出具有一定体积感的卡通形象. 将物体区域轮廓与深度层结合起来, Zeng 等<sup>[25]</sup> 分别构建基础曲面以及细节层, 最终合成浅浮雕模型. Wu 等<sup>[26]</sup> 则从图像的灰度值提取高度场, 通过对高度场的光滑处理得到浮雕的大致轮廓, 然后对图像进行细节增强处理并将细节与前面的光滑浮雕叠加. 针对非刚性物体的特点, Yeh 等<sup>[27]</sup> 对单幅输入图像进行分割、分层, 以及区域完整化处理, 然后交互标注斜坡程度以及曲率, 最后求解隆起的浮雕模型. Ji 等<sup>[28]</sup> 提出了在法线图基础上对已有浅浮雕模型进行法线风格化处理. 针对数字浅浮雕设计, Liu 等<sup>[29]</sup> 提出一种基于法向域的浅浮雕重新风格化方法. 在人脸浮雕模型生成研究中, Wu 等<sup>[30]</sup> 使用神经网络方法由人脸图像计算浮雕图像, 再用 Shape-from-Shading 技术构建人脸浅浮雕模型. 为了提高浅浮雕的精度, Lu 等<sup>[31]</sup> 提出基于三维深度图像和二维强度图像的混合人脸浅浮雕的生成算法. 在中国书法字浮雕生成研究中, Zhang 等<sup>[32]</sup> 对碑刻牌匾这类浮雕进行研究, 采用距离变换叠

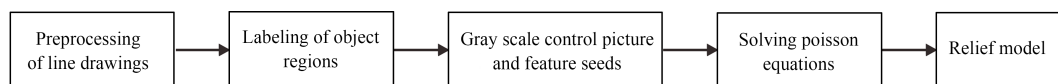


图 1 系统框架

Figure 1 System overview

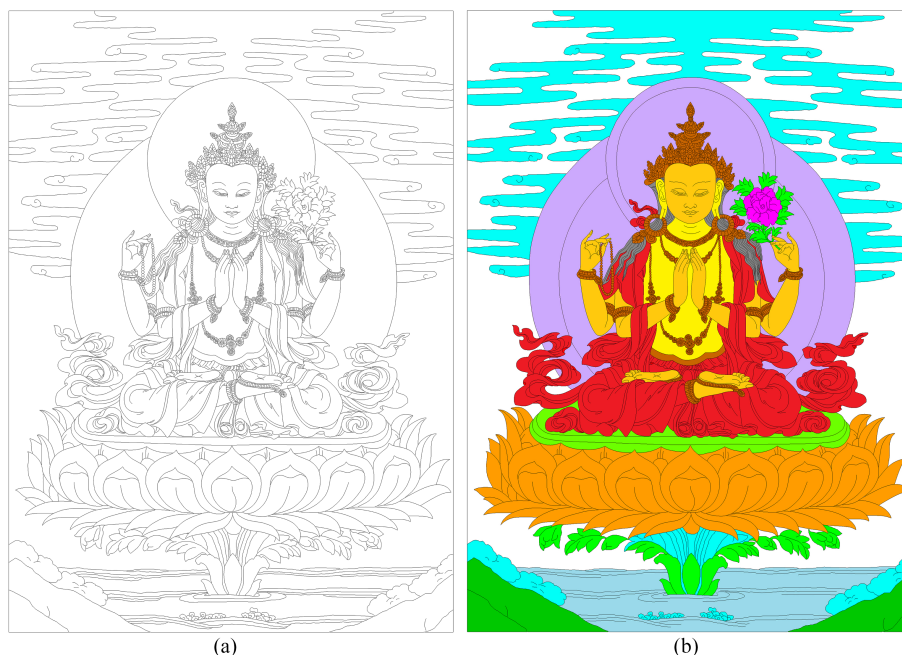


图 2 (网络版彩图) 唐卡四臂观音

Figure 2 (Color online) Shadakshari Avalokiteshvara. (a) Line drawing; (b) color labeling

加 Gauss 模糊的方法获取高度图作为浮雕表面. 最近, Zhang 等<sup>[33]</sup> 将各向同性和各项异性高度场结合起来, 通过求解非线性方程得到中国毛笔书法字的浅浮雕模型.

唐卡黑白线描图既不是三维物体模型, 也没有照片图像中物体的表面明暗信息, 因而无法用现有方法生成唐卡浮雕. 本文提出一个用唐卡线描图生成浮雕模型的方法, 其框架如图 1 所示. 在第 3~8 节中将对框架中各个部分详细介绍.

### 3 线描图预处理

先对输入黑白扫描图像进行预处理, 包括通过腐蚀处理去孤点噪声, 再通过膨胀处理连接一些断开的线条. 对于无法自动处理的地方, 用样条曲线交互连接断开的线条, 最后对线条进行单像素化处理得到单像素的黑白线条图像, 如图 2(a) 所示.

### 4 物体区域颜色标记

唐卡线描图包含多种物体, 但线描图是用黑色线条描绘物体轮廓以及物体表面的特征线, 目前无法在线描图中自动识别出各种物体. 我们解决这个问题的方法是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,具体选取传统的漫水填充 (flood fill) 算法实施颜色填充 (图 2(b)). 考虑到有些区域如衣物、莲台等由多个封闭区域连接构成,对每个封闭区域单独交互填色过于繁琐,我们提供一个交互工具,用户只需用鼠标在相关封闭区域上跨越移动,系统捕捉用户鼠标移动轨迹并将其作为种子点,然后在属于同一类物体的多个封闭区域内涂上相同的颜色.在填充完相关区域后,系统通过扫描各个区域内的颜色来识别对应的物体.接下来先简述 Poisson 方程及其求解方法,然后详细介绍不同种类物体的浮雕高度控制方式.

## 5 Poisson 方程

对于一个封闭区域  $R_i$ , 其边界为  $B_i$ , 在 Dirchelet 边界约束下的二维 Poisson 方程定义如下:

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

这里  $u(x, y)$  为方程的解, 在本文中代表图像上像素的灰度, 该灰度图也是浮雕的高度图, 其中亮的地方表示高度高, 暗的地方表示高度低.  $f(x, y)$  是已知函数, 在本文中是一些物体区域的灰度控制图 (参见第 6 和 7 节).  $c$  是区域边界上的约束值, 在系统中  $c$  取值为 0 或 1, 它们分别对应边界上的黑白种子点 (参见第 8 节). 在 Cartesian 网格下用二阶有限差分的形式近似式 (1):

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

该差分方程可以进一步推导后通过 Jacobi 迭代求解. 在给定的区域初始约束条件下, 用 Jacobi 迭代逐步将初始约束灰度值在区域内部扩散, 直到计算的高度图上相邻像素的明暗分布达到预定均衡状态为止. 我们设定迭代终止阈值、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. 如果始终无法达到平衡, 则迭代在进行最大迭代次数后自动终止. 本文将 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十秒内完成.

## 6 浮雕模型低频分量

人体的骨骼和肌肉使得人体表面隆起. 我们在观看唐卡线描图时, 大脑通过日常生活经验依然能识别出被衣服部分遮挡的躯干和四肢并在大脑中构造其隆起的趋势. 在浮雕中虽然将人体压扁处理, 但在压扁基础上依然要表现出人体表面的隆起. 因此在构建浮雕时也要表现出这个隆起趋势, 并将其作为浮雕模型的低频分量. 因为无法在线条画中自动识别躯干和四肢, 我们通过交互方式在唐卡线描图中将对区域涂红色得到人影区域 (图 3(a)). 将该红色区域作为一个蒙版, 进一步计算该图的距离变换 (distance transform, 一个封闭区域的距离变换是用灰度值标记区域内部每一个点到最近轮廓点的距离), 得到一个灰度图 (图 3(b)), 将其黑白反转并经过实验对反转后的灰度图进行三次方操作得到一个灰度控制图, 把该灰度控制图值赋到式 (1) 的  $f(x, y)$  中求解得到光滑的低频分量高度图, 再把低频分量高度图的像素坐标作为网格的  $x, y$  坐标, 像素值作为  $z$  坐标, 将该高度图转换成网格面片后并加光照显示 (图 3(c)).

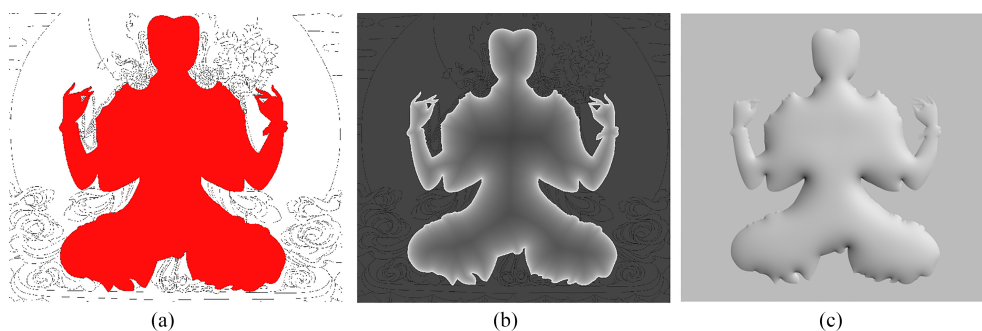


图 3 (网络版彩图) 浮雕模型低频分量处理

**Figure 3** (Color online) Low frequency component processing of the relief model. (a) Human figure region in Thangka; (b) distance transform of human figure region; (c) low frequency component of the relief model

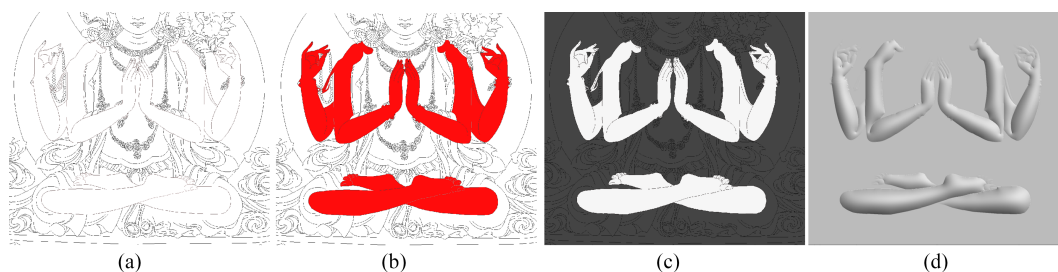


图 4 (网络版彩图) 人物四肢局部隆起处理

**Figure 4** (Color online) Limb regions processing. (a) Drawing arm and leg shapes; (b) arm and leg masks; (c) arm and leg control pictures; (d) result of Poisson diffusion

## 7 浮雕模型中频分量

浮雕模型的中频分量用来表现唐卡人物四肢以及手足的局部隆起。在唐卡中因人物姿势以及衣服的款式不同, 衣服对身体有部分遮挡。比如图 1(a) 中四臂观音的腿部就被衣服遮挡而只露出双脚。用遮挡腿部的衣服褶皱线条围成的各个小区域无法表现腿部的局部隆起。我们最初解决这个问题的思想是交互描绘出腿的形状, 如图 4(a) 所示。然后将四肢和手足涂成红色得到其蒙版 (图 4(b)), 再用图 4(c) 作为灰度控制图赋到式 (1) 的  $f(x, y)$  中 (相当于令  $f(x, y) = 1$ ) 求解得到四肢和手足局部隆起的效果 (图 4(d))。

观察图 4(d) 可以发现如下两个问题: (1) 虽然在加入腿部轮廓线后在浮雕中可以表现出腿部局部隆起, 但在唐卡原线描图中腿部是被衣服遮住的, 不应该看到腿部的轮廓。我们希望在浮雕中既能表现出腿部的局部隆起, 又能表现出衣服在腿部的自然覆盖效果。(2) 手指脚趾部分浮雕高度不够, 导致它们在视觉效果上不够明显。

对于腿部出现轮廓问题, 改进方案如下。将四肢蒙版 (图 4(b)) 换成人影区域的蒙版 (图 5(a)), 再将图 4(b) 的四肢蒙版进行距离变换得到图 5(b), 将其赋到式 (1) 的  $f(x, y)$  中求解得到图 5(c) 的结果。从图 5(c) 可以看出在改进方案的扩散结果中既表现了四肢的局部隆起, 又看不到腿部轮廓, 从而表现了衣服在腿部的自然覆盖效果。

关于手指脚趾浮雕高度不够问题, 其原因是 Poisson 扩散结果与区域形状以及面积大小有关系, 狭小细长的区域相对于宽大的区域对应求解的浮雕高度较低。我们解决这个问题的思想是在手指区域上

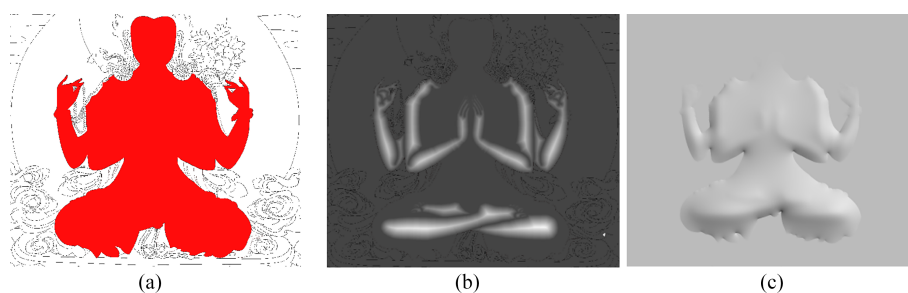


图 5 (网络版彩图) 人物四肢局部隆起的改善处理

**Figure 5** (Color online) Improved limb regions processing. (a) Body figure mask; (b) distance transform of limbs; (c) result of Poisson diffusion

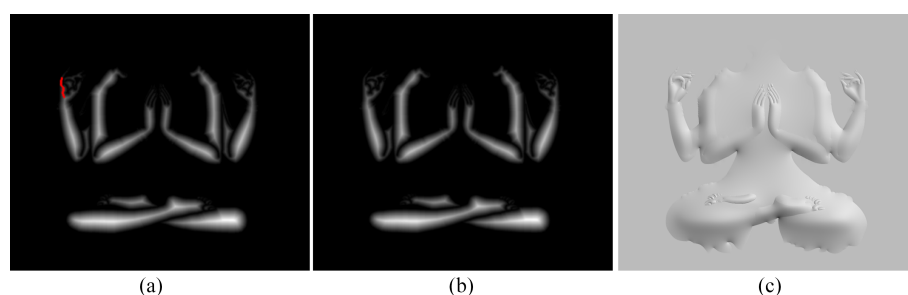


图 6 (网络版彩图) 手指脚趾部分抬高处理

**Figure 6** (Color online) Fingers and toes enhanced processing. (a) Positions to be enhanced; (b) result of Poisson diffusion; (c) enhanced relief

赋较大的  $f(x, y)$  值, 具体操作步骤如下: (1) 在四肢蒙版距离变换图 (图 5(b)) 上点击手指区域中骨骼线上的两个端点, 然后自动找到这两点 (或者多点) 之间距离变换图最亮的线, 即骨骼线 (图 6(a)). (2) 创建一个白底的方形画布, 画布边长  $size$  是选中骨骼线  $x$  方向或  $y$  方向距离最大的值, 然后求骨骼线的距离变换得到图像  $IS$ . (3) 对于图像  $IS$  上的某个像素点  $p(i, j)$ , 如果它的像素值小于  $size$ , 则令其像素值为  $(1 - \sin(\pi/(2 \times size) \times p(i, j))) \times 0.5$ . (4) 把四肢距离变换图反相得到  $IV$ , 将图像  $IS$  与  $IV$  相乘得到图像  $IE$ . (5) 将图像  $IE$  叠加到原四肢距离变换图 (图 5(b)) 上得到新的四肢灰度控制图 (图 6(b)). (6) 将新的四肢灰度控制图赋到式 (1) 的  $f(x, y)$  中求解.

对其他手指以及双脚进行类似的处理, 最后得到的浮雕中频分量效果如图 6(c) 所示, 从图中可以看出手指脚趾的视觉效果明显改善.

## 8 浮雕模型高频分量

浮雕高频分量对应唐卡中细节的地方, 如面部、发饰、首饰等物体所在区域, 或者是衣服褶皱、云朵表面因表现遮挡的陡峭起伏. 我们根据这些物体的特征将其分为 3 类情况进行处理.

### 8.1 人脸部分

人头骨和面部肌肉的结合使得人物面部在不同的部位有不同的起伏, 如眼睛因眼球作用导致眼帘形状向前隆起, 鼻梁和嘴唇也都隆起, 此外还有鼻梁两侧的轻微凹陷. 但在唐卡线描图中没有人物面部

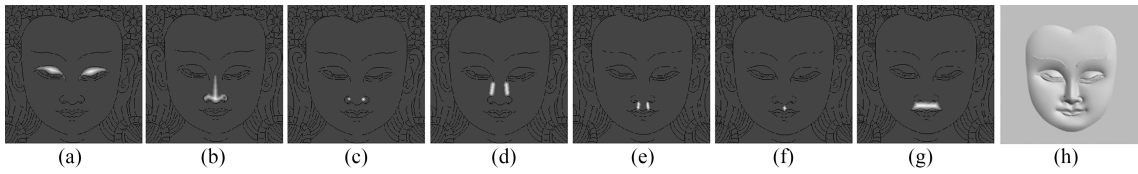


图 7 面部局部灰度控制图以及浮雕结果

**Figure 7** Gray-scale control pictures of local face regions and generated relief. (a) Eyelid; (b) nose; (c) ala nasi; (d) left and right sides of bridge; (e) left and right sides of philtrum; (f) philtrum; (g) upper lip; (h) relief generated

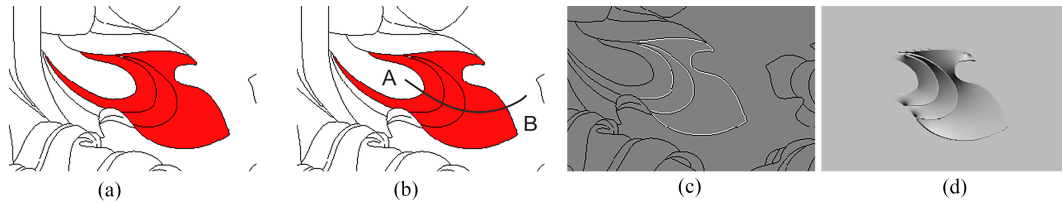


图 8 (网络版彩图) 衣服局部区域添加黑白种子点

**Figure 8** (Color online) Adding black and white seeds in cloth regions. (a) Mask of region of interest; (b) drawing lines interactively; (c) adding black and white seeds; (d) relief generated

这些局部隆起或凹陷信息, 为了在浮雕中表现出这些局部隆起或凹陷, 必须在人物面部区域添加一些控制信息. 先以上眼帘为例, 将上眼帘区域选出来, 然后计算它们的距离变换得到上眼帘的灰度控制图 (图 7(a)). 再以鼻子为例, 在对应鼻梁位置画出一个三角形, 在鼻左右两翼以及鼻尖位置画一个上下颠倒的  $W$  形, 然后计算三角形和倒  $W$  形组合后区域的距离变换得到鼻梁的灰度控制图 (图 7(b)), 在鼻左右两翼中心位置再画两个小圆, 计算它们的距离变换得到鼻翼的灰度控制图 (图 7(c)). 类似地可以得到面部其他局部区域的灰度控制图, 不再赘述.

我们将图 7 中的所有灰度图 (图 7(a)~(g)) 合成一个面部整体的灰度控制图, 由于鼻梁两侧以及嘴唇上侧人中位置的灰度控制图 (图 7(d) 和 (f)) 是用于表现局部凹陷的, 在合成整体面部灰度控制图时需将它们进行负向叠加, 最后把合成的面部灰度控制图带入式 (1) 的  $f(x, y)$  中求解就能得到人脸浮雕模型 (图 7(h)).

## 8.2 层层遮挡效果物体

在唐卡线描图中, 人物穿着的衣服、天空的云朵, 以及山峦这类物体是用其轮廓线以及内部特征线描绘出来的, 其内部特征线 (如衣服褶皱线) 表现了这类物体的表面遮挡起伏. 在浮雕中这种遮挡是通过物体边线以及内部特征线位置上的陡峭凸起表现的. 为了实现这种效果, 在有关线条一侧添加白色像素种子点, 其另一侧是黑色像素种子点, 然后将这些白色和黑色像素种子点作为 Poisson 方程的边界约束就能得到边缘线以及内部特征线位置上高度突变以及区域内高度渐变的浮雕结果. 以衣服上某局部区域为例说明如下 (图 8): (1) 把当前需要计算的衣服局部区域涂红色得到其蒙版 (图 8(a)). (2) 用鼠标从 A 拖动到 B (图 8(b)), 并记录下鼠标路径与哪些内部特征线相交. (3) 用我们早期工作中的算法<sup>[34]</sup> 判断内部特征线的凹凸性, 并在特征线的凹侧添加白色种子点, 在轮廓线内测添加白色种子点 (图 8(c)). (4) 将这些黑白特征约束带入式 (1) 作为边界约束  $c$  求解得到该区域的衣服浮雕起伏效果 (图 8(d)).

云朵、水波、山峦、花卉等物体可以用同样方法处理, 不赘述.

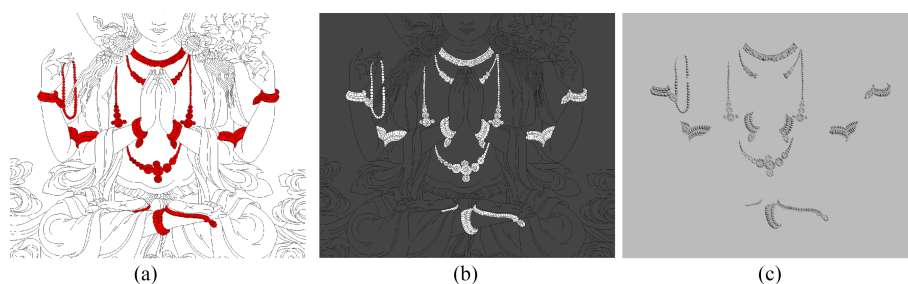


图 9 (网络版彩图) 饰品处理

**Figure 9** (Color online) Jewel ornaments processing. (a) Jewel ornaments mask; (b) gray scale control picture; (c) relief generated

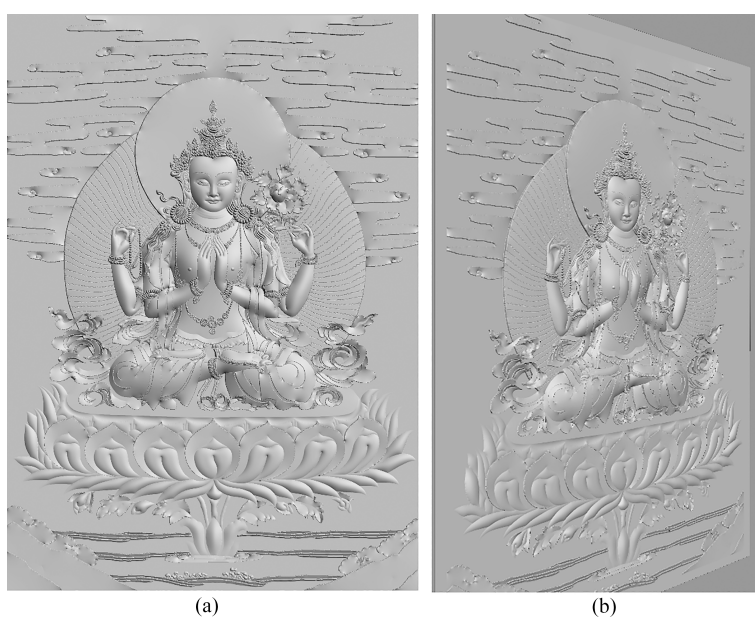


图 10 唐卡四臂观音浮雕效果

**Figure 10** Shadakshari Avalokiteshvara. (a) and (b) Two views of generated relief

### 8.3 饰品

在一些女性唐卡人物身上还有不同的珠宝饰品, 由于它们的封闭区域尺寸比较小 (图 9(a)), 可以在式 (1) 中令  $f(x, y) = 1$  (图 9(b)), 然后求解 Poisson 方程生成它们对应的浮雕高度 (图 9(c)).

## 9 结果展示

将上述各节中生成的低频分量、中频分量, 以及高频分量高度图叠加就可以得到最终的唐卡浮雕高度图, 在系统界面中设置了叠加控制按钮, 用户可以通过改变叠加系数来强化或弱化某个分量以满足审美需要, 叠加完毕后将得到的高度图转化为网格面片并加光照显示.

图 10(a) 是唐卡四臂观音的正面浮雕效果. 四臂观音是藏传佛教中最受欢迎的本尊之一, 其特征是身穿菩萨璎珞装, 头戴宝冠, 一面四臂, 前双手合十, 另一左手持莲花, 另一右手持念珠. 背景中有



表 1 四臂观音不同区域计算机处理时间及交互时间  
**Table 1** Computational time and interaction time spent on different regions

Region	size (pixel)	Solving Poisson equations (s)	Interactive operations	Interaction time (min)
Body region	1030×1194	48.8	Delete lines inside body region	< 5
Limbs	1030×1194	42.73	Add lines of arms and legs as well as control picture	< 10
Face	241×276	16.05	Select eyes and mouth interactively	< 1
Left side background light	502×1135	1.78	Assign white and black seeds interactively	< 1
Light around head	762×723	2.33	Assign white and black seeds interactively	< 1
Hair and jewel ornaments	694×819	2.42	Select hair and jewel ornaments	< 3
Clouds, mountains and water waves	2008×2799	46.12	Add boundary constraints interactively	< 3

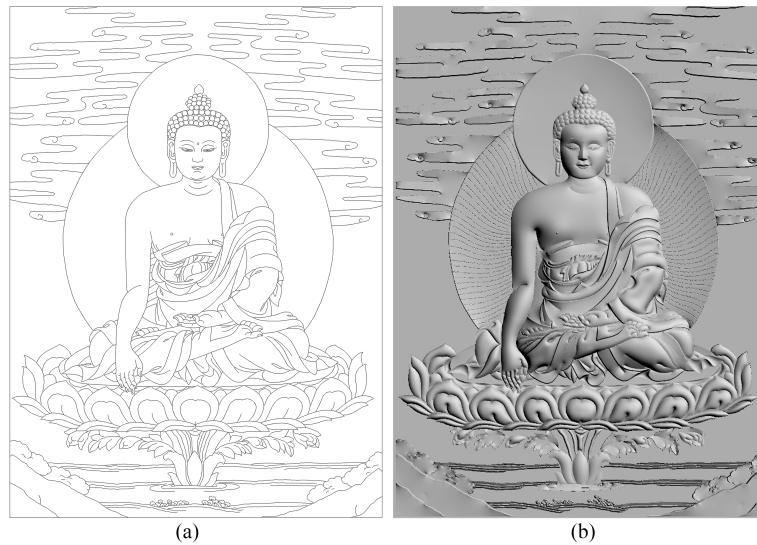


图 11 唐卡释迦牟尼

**Figure 11** Sakyamuni Buddha. (a) Line drawing; (b) relief generated

云、山、水、花、佛光、莲台等物体. 改变视角显示浮雕的侧面 (图 10(b)), 从中可以看到人体低频分量使得四臂观音像主体比较突出, 四臂观音像肢体部分也比较圆润、饱满. 此外, 唐卡中的衣袖、云彩、水波、山峦部分也得到很好的表现, 衣服以及飘带显得飘逸.

系统实验的运行平台为 Core i5-4590 3.30 GHz 处理器, GTX970 GPU, 8 GB 内存. 表 1 给出了四臂观音唐卡浮雕一些区域的计算机处理时间和交互时间. 从表 1 中数据可见本文用 GPU 加速计算 Poisson 方程的时间开销还是很小的.

第 2 个例子是唐卡释迦牟尼, 图 11(a) 是对应的线条画, 释迦牟尼佛右手结触地印, 左手结禅定

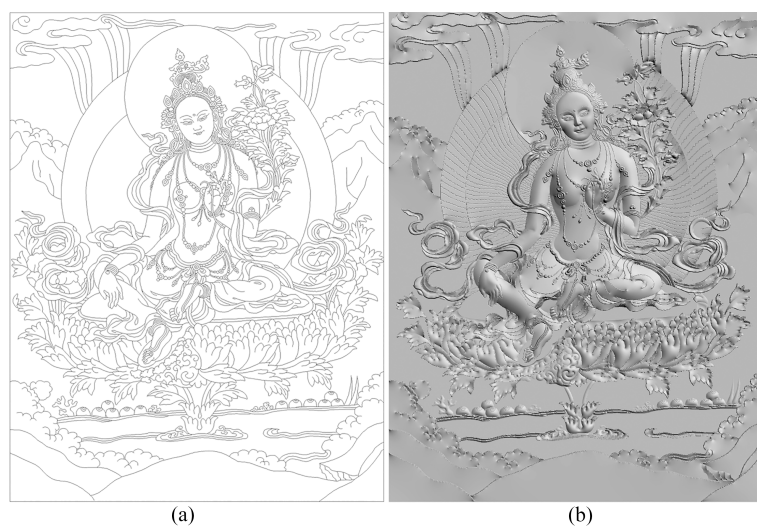


图 12 唐卡绿度母

Figure 12 Green Tara. (a) Line drawing; (b) relief generated

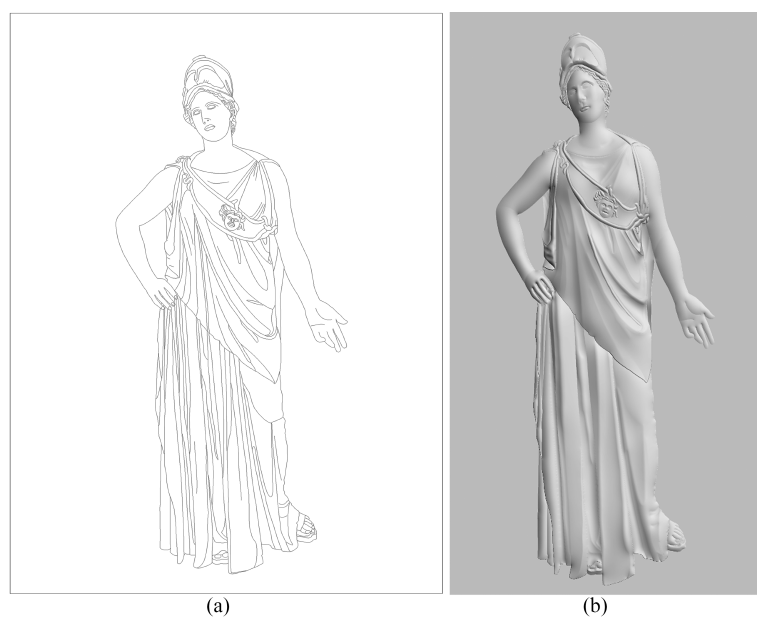


图 13 希腊女神雅典娜

Figure 13 Greek goddess Athena. (a) Line drawing; (b) relief generated

印, 跏趺坐于莲花座. 图 11(b) 是唐卡浮雕效果.

第 3 个例子是唐卡绿度母, 图 12(a) 为对应的线条画. 度母亦称救度母, 印度称为多罗, 西藏称为卓玛, 是藏传佛教尊奉的女神. 传说度母是观世音菩萨眼泪所化, 有 21 位身色形不同的度母, 其中最受尊崇的是绿度母和白度母. 本例的绿度母右手结施愿印, 左手置髀间持青莲, 双脚屈左展右, 左腿单坐, 右腿向下舒展. 在本例中可以看到除了人物绿度母之外, 其他物体形状非常复杂, 但用本文方法依然能够生成很好的浮雕效果 (图 12(b)).

最后展示一个非唐卡的例子, 古希腊神话中的智慧女神雅典娜. 图 13(a) 是雅典娜的线描图, 她戴着头盔, 一只手叉腰, 另一只手向前伸展. 图 13(b) 是生成的浮雕效果. 通过这个例子可见本文方法也能扩展到非唐卡浮雕的生成.

## 10 结论与将来工作

本文介绍一个基于黑白线条画的计算机辅助生成唐卡浮雕方法. 虽然黑白线描图没有物体深度信息, 我们用物体区域的灰度控制图以及区域边界种子约束求解 Poisson 方程获得了视觉上合理的唐卡浮雕模型. 文中给出的图例验证了我们方法的有效性. 应该指出, 浮雕作为一种三维视觉艺术, 对物体的深度亦有不同的处理手法从而形成不同风格的浮雕. 用我们方法生成的唐卡浅浮雕也是一种风格, 这对唐卡艺术的传承与发展也是一个新贡献. 在我们生成的唐卡浮雕模型基础上, 浮雕设计师也可以把模型输入到商用图形软件如 3DMax 或 Maya 中并进行编辑, 从而得到新风格的唐卡浮雕. 在未来工作中我们打算模拟堆绣唐卡, 这需要研究堆绣唐卡的制作过程以及堆绣唐卡的建模和绘制技术. 我们相信随着相关工作的深入开展非物质文化遗产唐卡艺术必将在新的技术条件下焕发出异彩.

## 参考文献

- 1 Kerber J, Wang M, Chang J, et al. Computer assisted relief generation – a survey. *Comput Graph Forum*, 2012, 31: 2363–2377
- 2 Cignoni P, Montani C, Scopigno R. Computer-assisted generation of bas-and high-reliefs. *J Graph Tools*, 1997, 2: 15–28
- 3 Fattal R, Lischinski D, Werman M. Gradient domain high dynamic range compression. *ACM Trans Graph*, 2002, 21: 249–256
- 4 Weyrich T, Deng J, Barnes C, et al. Digital bas-relief from 3D scenes. In: *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, San Diego, 2007
- 5 Sun X F, Rosin P L, Martin R R, et al. Bas-relief generation using adaptive histogram equalization. *IEEE Trans Visual Comput Graph*, 2009, 15: 642–653
- 6 Zhao P, Bian Z. The bas-relief on curved surface from 3D meshes. *J Comput-Aid Des Comput Graph*, 2010, 22: 1126–1131 [赵鹏, 边哲. 曲面浅浮雕生成算法. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2010, 22: 1126–1131]
- 7 He H Z, Yang X N. Relief generation on surfaces. *J Comput-Aid Des Comput Graph*, 2010, 22: 1132–1137 [何会珍, 杨勋年. 曲面浮雕生成. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2010, 22: 1132–1137]
- 8 Zhou S Z, Liu L G. Realtime digital bas-relief modeling. *J Comput-Aid Des Comput Graph*, 2010, 22: 434–439 [周世哲, 刘利刚. 实时数字浮雕建模. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2010, 22: 434–439]
- 9 Zhang L S, Tong J. Real-time interaction based modeling method for 3D objects with relief-texture. *J Comput Appl*, 2017, 37: 2302–2306 [张洛声, 童晶. 实时交互的带浮雕纹理的三维模型构建方法. *计算机应用*, 2017, 37: 2302–2306]
- 10 Song W, Belyaev A, Seidel H P. Automatic generation of bas reliefs from 3D shapes. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications*, Washington, 2007. 211–214
- 11 Kerber J. Digital art of bas-relief sculpting. Dissertation for Master Degree. Saarbrücken: Univeristy of Saarland, 2007
- 12 Kerber J, Tevs A, Belyaev A, et al. Feature sensitive bas relief generation. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications*, Beijing, 2009. 148–154
- 13 Bian Z, Hu S M. Preserving detailed features in digital bas-relief making. *Comput Aided Geometric Des*, 2011, 28: 245–256
- 14 Wang M, Kerber J, Chang J, et al. Relief stylization from 3D models using featured lines. In: *Proceedings of the 27th Spring Conference on Computer Graphics*, Viničné, 2011. 63–68
- 15 Miao Y W, Chen M Y, Fang X D, et al. 3D model sculpturing technique bades on drawing lines. *J Comput-Aid Des Comput Graph*, 2016, 28: 50–56 [缪永伟, 陈敏燕, 方旭东, 等. 基于线画图案的三维模型雕刻. *计算机辅助设计与*

- 图形学学报, 2016, 28: 50–56]
- 16 Zhang Y W, Zhang C, Wang W, et al. Adaptive bas-relief generation from 3D object under illumination. *Comput Graph Forum*, 2016, 35: 311–321
  - 17 Li B, Liu S L, Zhang L Y. Bas-relief generation using manifold harmonics analysis. *J Comput-Aid Des Comput Graph*, 2012, 24: 252–261 [李博, 刘胜兰, 张丽艳. 基于流形调和变换的浅浮雕生成算法. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2012, 24: 252–261]
  - 18 Hu J Q, He S, Lyu L. Placement optimization for generating bas-reliefs based on visual saliency. *J Comput-Aid Des Comput Graph*, 2016, 28: 2128–2133 [扈婧乔, 何莎, 吕琳. 考虑视觉显著性的模型浅浮雕位置优化算法. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2016, 28: 2128–2133]
  - 19 Wu M J, Wang S W, Shi L, et al. Effective representation and 3D printing for bas-relief. *J Comput-Aid Des Comput Graph*, 2017, 29: 1816–1823 [吴美娟, 王士玮, 石磊, 等. 曲面浮雕的高效表示及 3D 打印算法. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2017, 29: 1816–1823]
  - 20 Alexa M, Matusik W. Reliefs as images. *ACM Trans Graph*, 2010, 29: 1
  - 21 Li Z W, Wang S, Yu J H, et al. Restoration of brick and stone relief from single rubbing images. *IEEE Trans Visual Comput Graph*, 2012, 18: 177–187
  - 22 Meng Y, Zhou M Q, Shui W Y, et al. Three-dimensional relief generation on freedom surface based on monocular image. *J Syst Simul*, 2015, 27: 3012–3017 [孟悦, 周明全, 税午阳, 等. 基于单幅图像的三维自由曲面浮雕生成. *系统仿真学报*, 2015, 27: 3012–3017]
  - 23 Wu T P, Tang C, Brown M S, et al. ShapePalettes: interactive normal transfer via sketching. In: *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, San Diego, 2007
  - 24 Sýkora D, Kavan L, Čadík M, et al. Ink-and-ray: bas-relief meshes for adding global illumination effects to hand-drawn characters. *ACM Trans Graph*, 2014, 33: 1–15
  - 25 Zeng Q, Martin R R, Wang L, et al. Region-based bas-relief generation from a single image. *Graph Model*, 2014, 76: 140–151
  - 26 Wu W M, Liu L G. Course-to-fine bas-relief generation algorithm from images. *Coll Math*, 2016, 32: 1–7 [吴文明, 刘利刚. 由粗到细的图像浅浮雕生成算法. *大学数学*, 2016, 32: 1–7]
  - 27 Yeh C K, Huang S Y, Jayaraman P K, et al. Interactive high-relief reconstruction for organic and double-sided objects from a photo. *IEEE Trans Visual Comput Graph*, 2017, 23: 1796–1808
  - 28 Ji Z P, Ma W Y, Sun X F. Bas-relief modeling from normal images with intuitive styles. *IEEE Trans Visual Comput Graph*, 2014, 20: 675–685
  - 29 Liu Y J, Ji Z P, Liu Z, et al. Stylized design of bas-relief based on normal field. *J Comput-Aid Des Comput Graph*, 2016, 28: 2120–2127 [刘玉洁, 计忠平, 刘真, 等. 基于法向域的浅浮雕风格化设计. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2016, 28: 2120–2127]
  - 30 Wu J, Martin R R, Rosin P L, et al. Making bas-reliefs from photographs of human faces. *Comput-Aid Des*, 2013, 45: 671–682
  - 31 Lu Q, Wang L, Meng X X, et al. The bas-relief generation method of human faces from 3D depth images and 2D intensity images. *J Comput-Aid Des Comput Graph*, 2015, 27: 1172–1181 [陆巧, 王璐, 孟祥旭, 等. 结合深度图像和强度图像的人脸浅浮雕生成算法. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2015, 27: 1172–1181]
  - 32 Zhang T, Zhang L L, Yu J H. Computer generation of 3D inscriptions from 2D images of chinese calligraphy. *Chinese J Comput*, 2014, 37: 2380–2388 [张婷, 章立亮, 于金辉. 用单幅图像生成书法碑刻及牌匾效果. *计算机学报*, 2014, 37: 2380–2388]
  - 33 Zhang Y W, Chen Y, Liu H, et al. Modeling Chinese calligraphy reliefs from one image. *Comput Graph*, 2018, 70: 300–306
  - 34 Ding X Q, Hu T C, Peng R, et al. Computer-aided rendering of chinese meticulous figure paintings. *J Comput-Aid Des Comput Graph*, 2015, 27: 1189–1195 [丁孝强, 胡桃成, 彭韧, 等. 计算机辅助绘制工笔人物画效果. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2015, 27: 1189–1195]

## Generation of Thangka relief from line drawings

Meng XIA<sup>1</sup>, Rong ZHANG<sup>1</sup>, Ren PENG<sup>3</sup> & Jinhui YU<sup>1,2\*</sup>

1. *State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;*

2. *Department of Computer Science, Harbin Finance University, Haerbin 150030, China;*

3. *College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*

\* Corresponding author. E-mail: [jhyu@cad.zju.edu.cn](mailto:jhyu@cad.zju.edu.cn)

**Abstract** Line drawings lack the three-dimensional (3D) information of the depicted objects, which is present in 3D models and photographs based on relief-generation techniques. Therefore, creating relief surfaces from line drawings presents special research challenges. This paper creates a 3D relief model of Thangka, the Intangible Cultural Heritage of China and UNESCO, from line drawings. To obtain the relief surfaces, our approach solves Poisson equations under the constraints of gray-scale control pictures and boundary seeds of the object regions. The Thangka relief is divided into low-frequency, mid-frequency and high-frequency components. The low- and mid-frequency components respectively correspond to the height of the human body and the limbs in the relief model, and are obtained by solving the Poisson equations constrained by distance transformations. The high-frequency components correspond to the heights of local details such as eyebrows, flowers, clouds, and mountains in the relief model, and are obtained by solving the Poisson equations with boundary constraints. Finally we add the height maps of the three components and transform the resultant height map into a mesh model of the relief. The effectiveness of our approach is demonstrated in several examples.

**Keywords** intangible cultural heritage, Thangka, line drawing, Poisson equation, relief



**Meng XIA** was born in 1993. She received her B.Sc. in computer science from Hangzhou Dianzi University, M.Sc. at the State Key Lab of Computer-Aided Design and Computer Graphics (CAD&CG), Zhejiang University. Currently she is working towards the Ph.D. degree in the Computer Science and Engineering Department, Hong Kong University of Science and Technology. Her research interests are visualization and human-computer

interactions.



**Rong ZHANG** was born in 1991. Currently, she is a Ph.D. candidate at the State Key Lab of CAD&CG, Zhejiang University. Her research interests are non-photorealistic rendering and view synthesis with deep learning.



**Ren PENG** was born in 1968. He is an associate professor of computer science at Zhejiang University, deputy director of the Department of Digital Media, and deputy secretary-general of the Industrial Design Society of Zhejiang Province. His research interests are digital media art design, creative design, and information interaction design.



**Jinhui YU** was born in 1960. He received his B.Sc. and M.Sc. degrees in electronics engineering from Harbin Engineering University (formerly Harbin Shipbuilding Engineering Institute), China, in 1982 and 1987, respectively. He received his Ph.D. degree in computer graphics from the University of Glasgow in 1999. He is a professor of computer science at State Key Lab of CAD&CG, Zhejiang University. He is also a guest professor in the

Department of Computer Science, Harbin Finance University, China. His research interests are image-based modeling, non-photorealistic rendering, computer animation, and computer graphics art.