

引用格式:王昊,王琰,侯小刚,赵海英.基于几何材质约束优化的图像三维雕刻化算法[J].中国传媒大学学报(自然科学版),2023,30(02):31-43.

文章编号:1673-4793(2023)02-0031-13

基于几何材质约束优化的图像三维雕刻化算法

王昊¹,王琰²,侯小刚²,赵海英^{2*}

(1.北京邮电大学计算机学院,北京 100876;

2.北京邮电大学人工智能学院,北京 100876)

摘要:现有三维雕刻模型生成研究中注重模型网格的生成,而少涉及雕刻材质生成。本文结合现实中雕刻作品的制作步骤,以及雕刻作品中细节的表现手法,提出通过分离雕刻模型主体与材质的方式优化雕刻模型的生成。利用雕刻模型的材质部分表现雕刻的细节,对三维网格部分生成后进行优化以减小生成模型的数据量。实验结果表明,可根据文物拓片和线稿图像,生成细节表现更加丰富且数据量更小的三维雕刻模型。

关键词:三维雕刻生成;几何材质约束优化;图像BRDF参数捕捉

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A

3D carving generation from image based on geometric material constrained optimization

WANG Hao¹, WANG Yan², HOU Xiaogang², ZHAO Haiying^{2*}

(1.School of Computer Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, BeiJing 100876, China;

2.School of Artificial Intelligence, Beijing University of Posts and Telecommunications, BeiJing 100876, China)

Abstract: Existing research on 3D carving generation focuses on the generation of model grids, and less on the generation of carving materials. So this article combines the production steps of carving works in reality and the expression techniques of details in carving works, and proposes to optimize the generation of carving models by separating the main body and materials of the carving model. The material part of the sculpting model is used to represent the details of the sculpting, and then the 3D mesh part is optimized to reduce the data volume of the generative model. The experimental results show that this article can generate 3D carving models with richer details and smaller data volume based on cultural relic rubbings and line draft images.

Keywords: 3D carving generation; geometric and material constrained optimization; image BRDF parameter capture

1 引言

博物馆数据库中存储着许多二维线稿、拓片等无法表达三维几何特征的数据,因其不易进行三维采

集,所以一般存储形式为图像格式。而雕刻这类具有空间起伏的物体更加适合放置在三维数字场景中进行展览,如果将这些二维数据进行三维化重构,则可以以为这些文化素材提供新的应用场景。

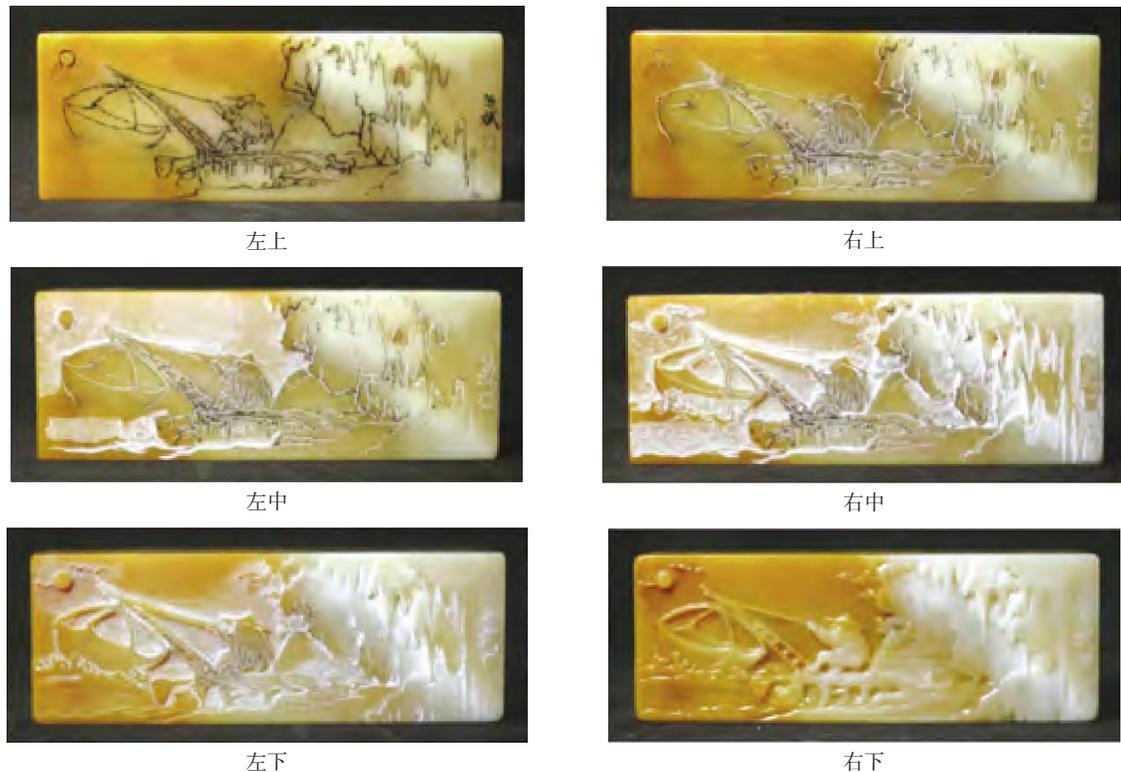


图1 寿山石雕制作步骤^[1]

(左上:在石材上绘制轮廓;右上:沿着轮廓用刀切割;左中:使用凿子分层、加工;右中:再次勾勒场景以强调不清晰的部分和细节;左下:基于右中和左下步骤中的轮廓进一步凿刻以产生分层)

现实中艺术家制作雕刻作品的过程可以分为两部分内容,分别是表达雕刻内容起伏的主体制作,以及表达雕刻内容的细节制作。

在雕刻内容主体制作过程中,选择雕刻石材的一个面作为基础面,从此面开始依次向下雕刻通过削减处理得到最终成品。因此,在进行雕刻模型生成的工作中可使用一种逆向思维进行考虑,将雕刻生成过程视为从一个基面不断向上做增加操作的过程,利用相对基面的高度图生成三维模型。

现有三维雕刻生成研究更注重模型网格生成,而很少涉及雕刻材质生成。本文通过分析现实中的制作过程,发现雕刻细节主要表现在石料材质以及雕刻刻刀的痕迹上,可以利用三维模型的材质来表达细节以更进一步优化网格模型。本文提出一种基于几何材质约束的图像三维雕刻生成算法,通过还原现有雕刻文物的PBR材质,然后利用多材质混合与细节法线增强的方式增强雕刻的细节表现,实现模型主体和细节的分离以优化雕刻模型的生成。

2 相关工作

2.1 二维图像三维化技术

二维图像三维化技术可分为基于线稿图像与基于二维灰度图像两种。

基于二维线稿图像生成雕刻网格模型方面,Kolomenkin等^[2]提出一种应用于复杂线稿图形,根据线稿笔画关联重建一致曲面生成线稿浮雕模型的算法。S'ykora D^[3]研究根据卡通线稿生成人物浮雕模型,通过交互方式在卡通线稿上增加区域和深度注释,以生成卡通形象的浮雕。Entem^[4]和Dvorožňák M等人^[5]则研究基于侧面草图创建动物三维模型,利用动物结构对称和四肢位置相对固定的特点进行模型生成。夏梦等人^[6]则通过增加交互手段,将线稿图像进行区域划分然后根据边界泊松约束进行唐卡的浮雕模型生成。

基于二维灰度图像生成雕刻网格模型方面,Zeng等^[7]基于Kolomenkin^[2]的思想提出了一种从一幅图像生成浅浮雕的算法,根据图像中对象的相对深度顺序

确定高度层,并使用此信息在3D浮雕模型中构建曲面。Wu^[8]和Governi L^[9]使用明暗恢复算法(SFS)的思想增加部分交互手段对光照条件进行初始化,从单个图像创建图像的浅浮雕模型。以上这些工作中都需要对图像中的灰度信息加以利用,Li^[10]和Zhang^[11]则分别提出了从拓片图像和碑刻牌匾进行浅浮雕模型和牌匾模型生成的技术,将图像分成高低频部分分别进行雕刻网格主体和细节部分进行网格生成。Zhang等^[12]对浅浮雕网格模型生成过程中的高度场生成部分进行优化,提出了一种非线性压缩函数,结合书法字的均匀高度场与非均匀高度场计算生成毛笔书法字的浅浮雕。

2.2 材质生成技术

基于单张图像的材质生成技术主要涉及对平面样本双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)及空间变化双向反射分布函数(Spatially Varying Bidirectional Reflectance Distribution Function, SVBRDF)参数进行捕捉。

SVBRDF参数捕捉方面,Deschaintre等^[13]通过设计一种网络,将用于局部特征提取的编码器—解码器卷积网络与用于全局特征提取和传播的全连接部分相结合;同时提出可微的SVBRDF相似性度量,将预测贴图的渲染与来自多个光源和观察方向的基准渲染进行比较,实现了BRDF参数的捕获。其随后又提出了一种新的深度学习方法^[14],能够从手机拍照得到的大量无序图片中估计材料外观,通过使用顺序无关的融合层,从每张图片中提取最有用的信息,以处理视角和入

射光角度的变化。Gao等人^[15]则提出了一个统一的深度逆渲染框架,从任意数量的输入照片估计平面样本的空间变化属性,其在空间变化外观的潜在嵌入空间中直接优化外观参数,不需要手动启发式的正则化优化。Guo等人^[16]提出了MaterialGAN,其基于StyleGAN2网络,经过训练可以合成真实的SVBRDF参数映射,将输入图像作为反向渲染框架中的材质贴图先验,生成与输入图像的外观匹配的材质贴图。

3 图像三维雕刻生成流程

基于几何材质约束优化的图像三维雕刻生成流程如图2所示,分为三维网格模型生成与雕刻模型材质生成两部分。

三维网格模型生成:首先进行雕刻内容的高度图生成,将高度图分为表现各区域高度差的基础高度部分和表现各区域之间过度的边缘高度部分,将两部分融合得到雕刻模型的高度图。然后根据高度图进行粗糙模型的生成,在得到粗糙模型后为了保证得到的模型可以流畅的应用于文物的三维展呈中,对粗糙模型进行优化,利用QEM算法以及拉普拉斯网格平滑对网格模型进行操作。

雕刻材质生成:首先对现有的雕刻文物材质图像的空间变化属性进行捕捉,获得其BRDF参数。为增强三维雕刻模型的细节,使用掩膜对主体与背景材质进行混合,利用生成的模型高度图生成法线增强贴图,与BRDF中的材质法线贴图融合得到雕刻PBR材质,最后融合网格模型和生成材质得到三维雕刻模型。

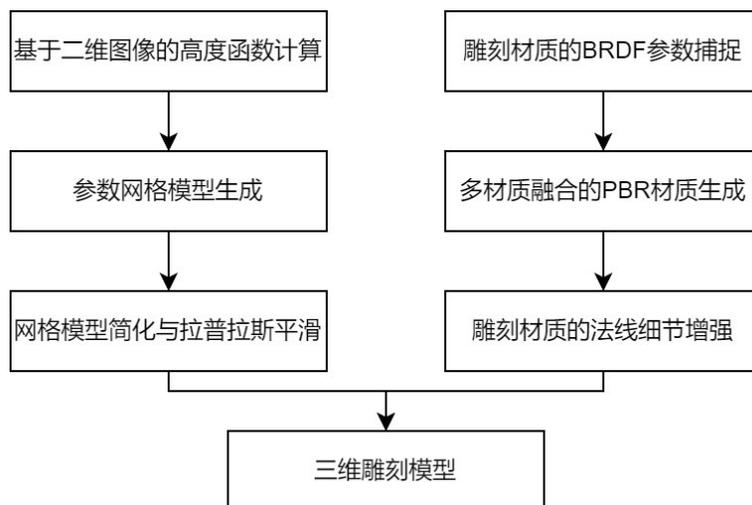


图2 图像三维雕刻生成流程

4 基于二维图像高度函数的三维网格生成

4.1 二维图像高度函数计算

将整个雕刻面的高度视为一个以0为基面的高度场,对于雕刻面 u ,其高度函数为: $H(u) = H_{base}(u) + H_{edge}(u)$,其中 $H_{base}(u)$ 为 u 位置基面高度函数, $H_{edge}(u)$ 为 u 位置边缘高度函数。根据拓片图像和线稿图像的内容特征得到的区域高度的拓扑关系 \square ,进行基面高度函数计算。通过三维空间中的射线检测,获得高精度雕刻文物三维模型的边缘起伏特征,进行边缘高度函数计算。

对于由数十条甚至数百条曲线组成的复杂图形来说,想要解释线稿中每个区域对应的基本高度,手

动执行此操作是一个繁琐的过程。对雕刻文物的研究可以发现,其高度基本是由基面依次向内增高。因此可以利用启发式的思想,通过判断线稿中各曲线间的关系进行区域高度关系的构建。对输入图像进行区域划分,构建由底面为起点的拓扑关系,然后根据各个区域拓扑关系依次得到各个区域的基础高度,将这个问题简化为图的约束拓扑排序问题,最后得到整体基本高度 $H_{base}(u)$ 。

在线稿的处理中,将线稿分为曲线、连接点以及邻域边界三种元素。其中曲线为线稿图像中的结构曲线,即线稿图中用于表达内容的线条。连接点是用于连接各个曲线的点,线稿中不应存在交叉的曲线,应视为多条曲线的连接(如图3右图表示)。

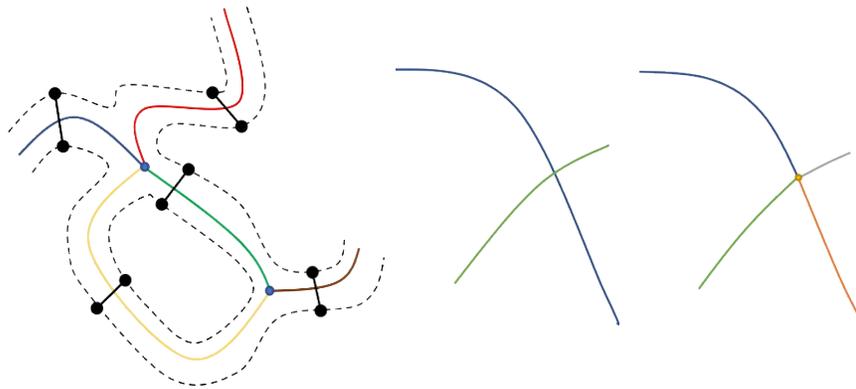


图3 线稿中的元素类型

(左图:线稿的曲线、连接点及邻域边界元素,其中不同颜色的实线为曲线,蓝色点为连接点,虚线为邻域边界;右图:交叉曲线在线稿元素分割过程中应视为多条曲线被一个点连接)

为得到线稿中各曲线的关系,首先要对线稿进行骨架提取得到各线条骨架,利用Zhang-Suen细化算法^[17]进行计算。在获得线稿骨架后,为得到线稿

中所有曲线需要对线稿中的连接点进行识别,通过删除线稿骨架图中的连接点得到曲线提取的结果(如图4)。

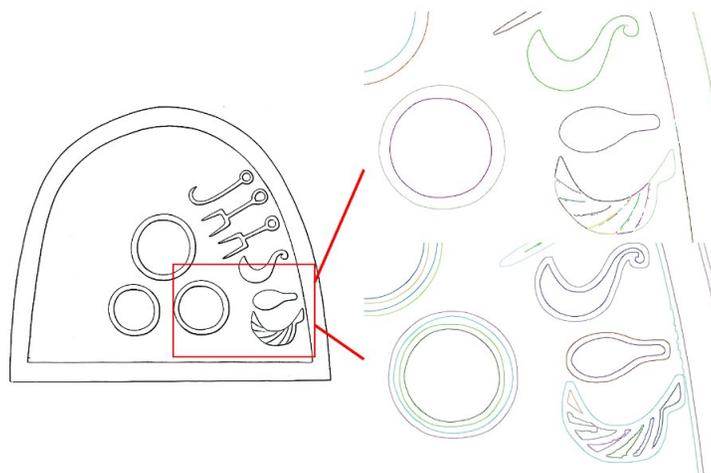


图4 线稿曲线及邻域边界提取结果

给定一幅线稿图的三元素,构建其无向图 $G = \{V, E\}$,其中以线稿的邻域边界作为图的顶点 V ,以曲线作为边界 E 。当曲线位于相应的边界之间时,两个顶点之间便存在一条边 E (如图 5 a、b 所示)。

对于构造好的无向图 G ,为了保证雕刻面由内容边界向内生成,需要为无向图指定一个起点使其成为有向图(如图 5 c 所示),查找线稿图中最接近图像边界的曲线邻域边界,将其作为有向图的构造起点。得到的有向图应为有向无环图(DAG),即对于图中顶点的值 h_i 和边的权值 w_{ij} 需满足约束:

$$h_i + w_{ij} = h_j, w_{ij} > 0 \quad (1)$$

其中 h_i 为顶点 i 对应曲线的高度权值, w_{ij} 为顶点 i 和 j 对应曲线的高度差值权值。

根据上述约束构造 DAG 的过程类似于图的拓扑排序过程(如图 5 d 所示),最终可从拓扑序列中得到每个曲线邻域边界的高度权值 h_i 。通过指定区域基础高度 B ,得到各临界边界包围区域内的整体基本高度函数:

$$H_{base}(u) = h_i * B \quad (2)$$

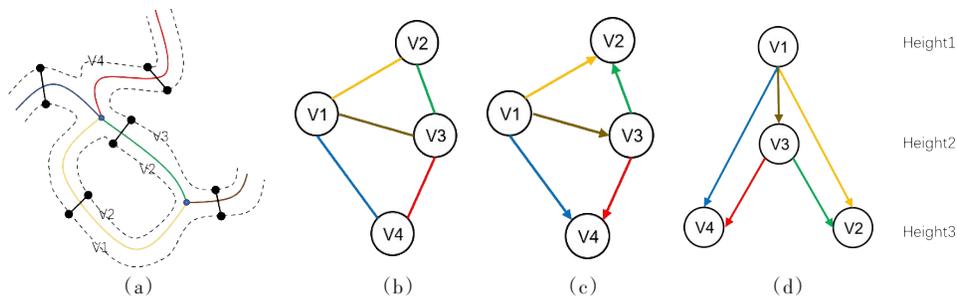


图 5 曲线高度关系构造过程

(a:线稿图的三元素示意图;b:线稿图构造的对应无向图;c:选取v1为起点构造的有向图;d:有向图的拓扑结构)

现实的雕刻文物中区域的边缘位置通常具有平滑的过度,边缘区域高度函数计算的手段一般是使用固定的变化函数或者利用距离推算变化,如在 Dvo-rožňák M^[17]和 Zhang^[11]的工作中都是利用简单的距离场增加一定倍数对边缘进行重建,这些方法没有很好地在生成过程中表现雕刻文物的特征。本文提出使用基于先验知识的高度函数拟合办法,利用现有雕刻三维模型主体边缘变化特征拟合高度函数。

首先通过三维空间中的射线检测操作对雕刻模型边缘高度变化进行提取,在空间中按照 0.5 间隔对

雕刻文物模型进行射线检测,得到视口到射线碰撞点距离 d_i ,将最远距离 d_{max} 处作为起始面,构建边缘变化点集 $T = \{P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_N\}$,为在高度方向上控制雕刻的起伏,需对高度变化进行归一化:

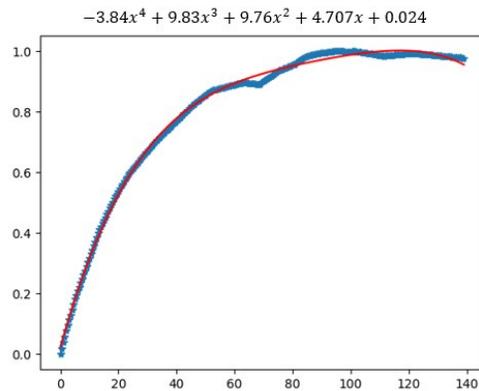
$$P_i = \left(i * 0.5, \frac{d_{max} - d_i}{d_{max}} \right) \quad (3)$$

对得到的点集 T ,利用最小二乘法对点集进行曲线拟合便可获得边缘部位的变化函数 $S(i)$:

$$S(i) = ployfit(T) \quad (4)$$



(a) 提取模型素材



(b) 边缘变化函数提取结果

图 6 雕刻文物模型边缘高度变化提取

得到边缘区域图像高度函数 $H_{edge}(u)$ 后, 结合基面高度函数 $H_{base}(u)$ 和边缘高度函数 $H_{edge}(u)$ 便可获得雕刻面 u 的高度函数:

$$H_{edge}(u) = S \left(\frac{u}{w} \right) * B \quad (5)$$

$$H_{base}(u) = H_{base}(u) + H_{edge}(u) = h_i * B + S \left(\frac{u}{w} \right) * B \quad (6)$$

其中 w 为曲线邻域宽度, B 为区域基础高度。

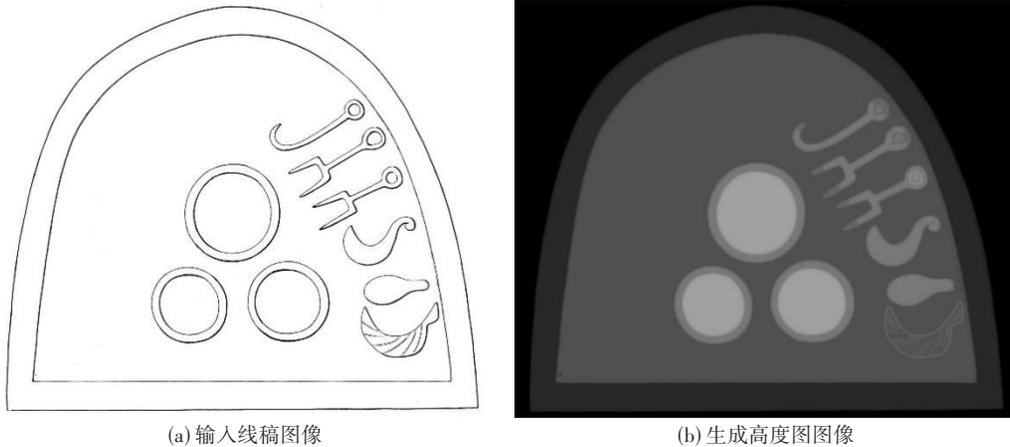


图6 高度图生成实例

(其中 $w = 20, B = 40$)

4.2 网格模型生成与优化

在获得雕刻面高度场后首先确定一个点数量为 $(x \times y)$ 的三维网格基面 $M = \{P_{(1,1)}, P_{(1,2)}, \dots, P_{(x,y)}\}$, 使用位移纹理映射技术, 根据雕刻面高度场对网格模型点进行位置计算获得粗糙三维网格模型(如图7b所示):

$$P_{(ij)} = \left(\frac{i}{x} * l, \frac{j}{y} * d, I \left(\frac{i}{x} * l, \frac{j}{y} * d \right) \right) \quad (7)$$

其中 I 为通过上小节方式计算得到的图像高度图, l, d 为图像的长和宽。

由二维图像高度图生成三维网格模型的过程中, 由于高度图像素值与三维网格几何位置插值难以对齐, 会导致模型表面十分粗糙(如图8a所示), 生成的三维网格模型表面存在复杂噪声。这些噪声会影响

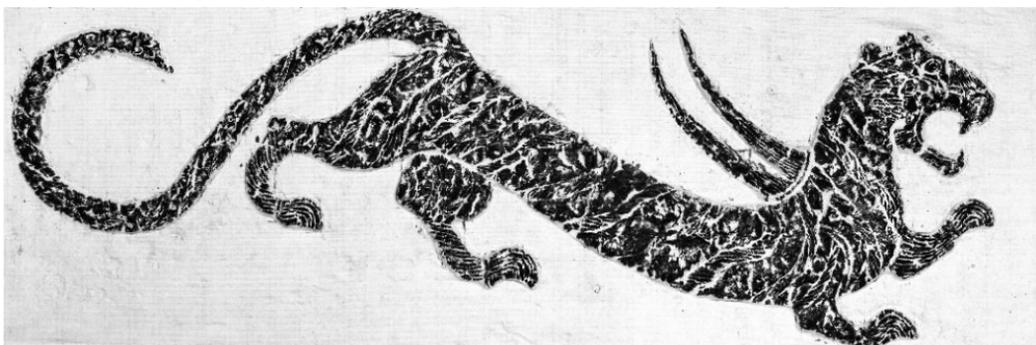
模型的成品质量, 通过引入拉普拉斯网格平滑的方法对网格模型进行平滑处理。对网格模型进行平滑后的细节效果见图8b。

因生成模型在许多部分的起伏并不明显, 在这些部分不需要过于密集的顶点, 因此可以通过减面处理对模型进行简化, 使用QEM算法^[18]对高精模型进行简化操作, 进一步优化模型(如图7c、图8c)。

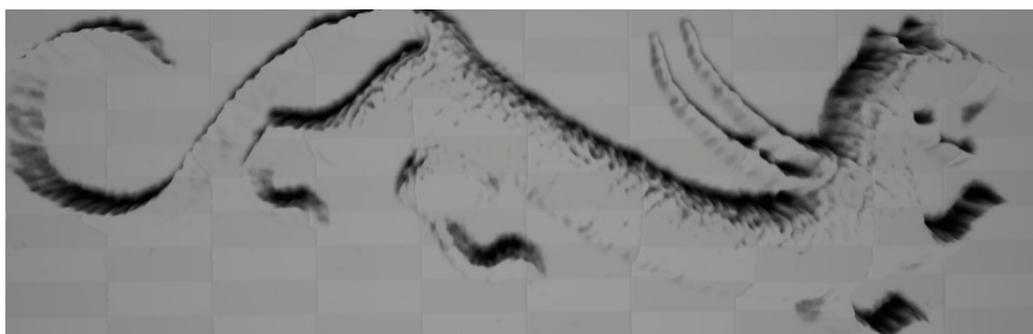
在进行边坍塌过程中, 网格部分顶点的位置会发生水平方向偏移, 引起简化模型UV映射的错乱, 需要对顶点UV坐标重新进行计算:

$$uv_i = \left[\frac{l - P_{(ij)}[1]}{l}, \frac{d - P_{(ij)}[2]}{d} \right] \quad (8)$$

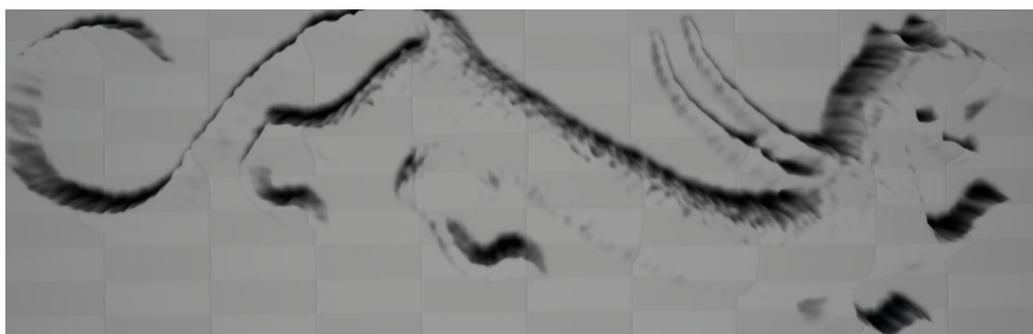
其中 l, d 为图像的长和宽, uv_i 为点 $P_{(ij)}$ 位置对应的UV坐标。



(a) 输入拓片图像

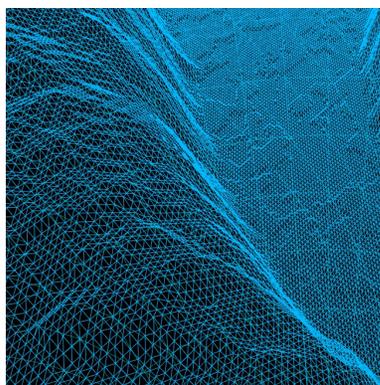


(b) 未优化模型,面数为775320

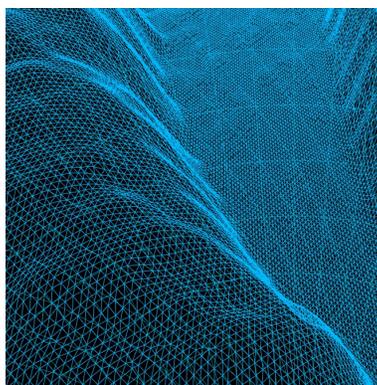


(c) 优化后模型,面数为276869

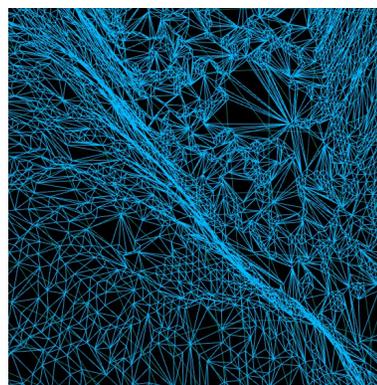
图7 拓片生成的网格模型及优化后模型



(a) 粗糙模型



(b) 拉普拉斯网格平滑后效果



(c) QEM算法简化后结果

图8 模型优化过程细节

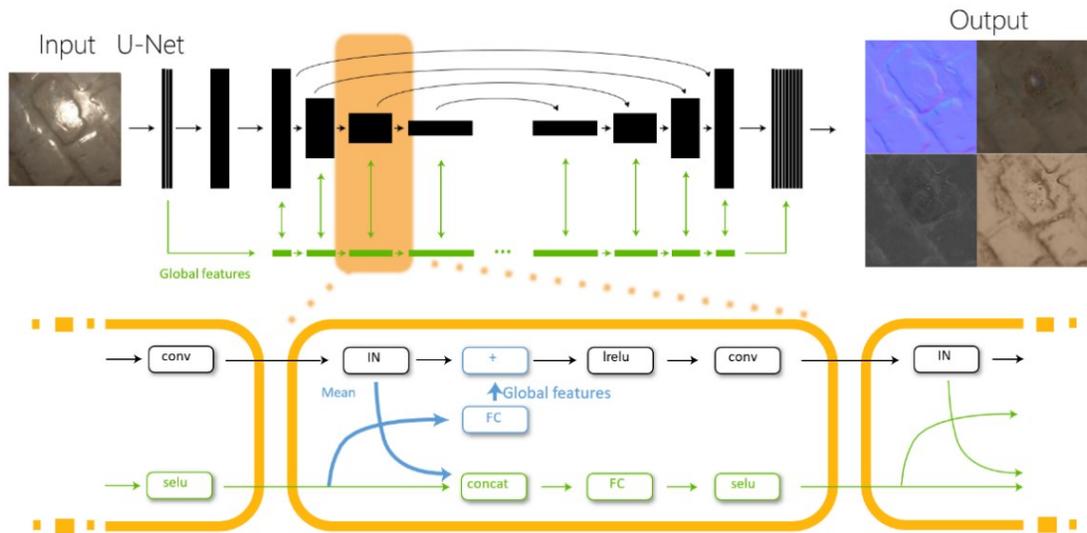
5 基于细节图像的雕刻材质生成

5.1 材质BRDF参数捕捉

现实世界物体的外观是由光、反射率和几何之间复杂的相互作用形成的。解开这些相互作用是空间变化属性捕捉的核心。许多不同的反射率可以产生相同的观察图像,任何照片都可以将高光部分叠加到漫反射率贴图上去完美地再现图像。通常采用两种方法来处理这种情况,一种方法是通过在不同的观察或照明条件下收集额外的

测量数据来减少模糊性,但它需要精确控制采集过程。第二种方法是引入多种解决方案的先验假设,利用卷积神经网络可以从数据中自动学习有效的先验关系。

本文采用Deschaintre V所提出的网络模型^[13]对雕刻文物的材质BRDF参数进行提取。该网络通过输入 $n \times n \times 3$ 的真实图像,可以获得图像的BRDF参数贴图($n \times n \times 10$),即:Diffuse贴图($n \times n \times 3$)、Normal贴图($n \times n \times 3$)、Roughness贴图($n \times n \times 1$)、Specular贴图($n \times n \times 3$)。

图9 模型结构图^[13]

模型采用一个基于U-Net^[19]的二级网络进行单张图像的BRDF参数提取。U-Net在粗空间尺度上卷积步长过大,在全局尺度上不能很好的保证远距离特征之间的依赖关系。因此增加一个并行网络轨道,用来处理全局特征向量,然后将多个尺度重新注入U-Net,每对信息交换在每个像素之间形成非线性依赖关系,通过在不同区域之间重复传输局部结果,以保证全局尺度中的特征依赖。

网络的目标是得到对应视角下渲染后图像的BRDF参数,BRDF参数贴图一般是为了使数字内容创作过程更加直观而增加的中间步骤参数,一旦更改光照方向重新渲染,未必再现基准图像的外观,因此在考虑网络的损失函数时不应该只考虑生成BRDF参数贴图与基准值之间的误差。

该网络模拟正向渲染过程,使用可微分的BRDF相似度量来避免渲染后效果差异过大,该度量利用

Cook-Torrance BRDF模型进行渲染,并对渲染结果按像素进行对比。

$$\mathcal{L}(I, I') = \|f_{\text{cook-torrance}}(I) - f_{\text{cook-torrance}}(I')\| \quad (9)$$

其中在BRDF渲染计算中应保证两者的入射光及视角条件相同。

网络利用艺术家创建的大型数据集^[20]对模型进行预训练,该数据集包含艺术家社区设计的2000多个程序性BRDF,其中包括各种常用高质量的材质如:木材、塑料、金属、皮革,以及与雕刻文物最相关的石材材质。由于这些材质被创建用于数字内容生成,因此每个材质都提供了一系列过程参数,允许利用随机变化生成新的数据,用于数据增强。本文通过对材质过程参数进行随机扰动,得到了20000多对BRDF数据用于训练。通过对采集得到的高精度文物模型贴图中的部分进行裁切,得到材质图像,输入模型得到对应的BRDF贴图(如图10)。

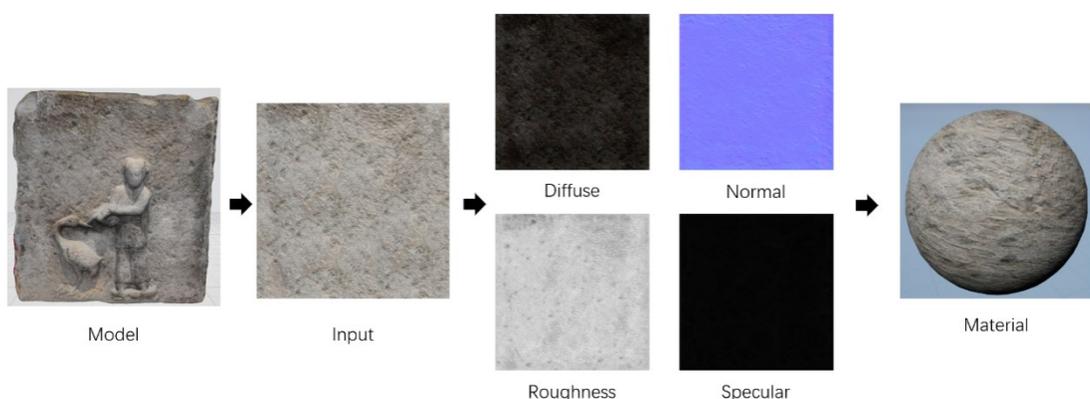


图10 BRDF贴图生成效果

5.2 材质细节增强

使用单一材质得到的三维雕刻模型在细节表达上依然存在欠缺。通过分析雕刻文物可以发现,在制作雕

刻时由于要对石材的面进行向内雕刻,因此背景和主体内容材质的纹理走向通常会有一些区别,可以以此来区分雕刻中的主体与背景(如图11)。同样,雕刻中的主体与背景接触的边缘以及主体内的线条也刻意地向下加深。

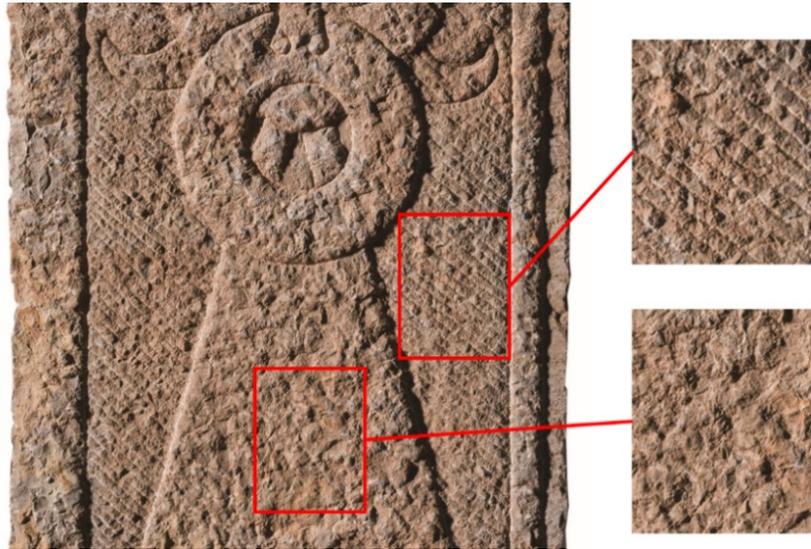


图11 汉代画像石

(主体部分通常会保持石材粗糙的原始纹理,背景部分通常会雕刻的更加细腻,甚至增加规则的线条)

为了区别生成材质中雕刻内容的主体与背景,并且使细节更加明显,本文利用分割拓片以及线稿图像对应的掩膜将材质进行混合,并通过高度图计算法贴图以增强雕刻细节。

5.2.1 多材质融合的PBR材质生成

直接对拓片图像利用阈值分割并进行高斯模糊,

即可得到区域的掩膜。线稿图像不存在划分好的区域,因此利用线稿图像生成的高度图进行区域分割,以得到掩膜。线稿图像中的曲线通常是结构部分,雕刻时会刻意加深,曲线邻域部分通常为细节。利用得到的掩膜进行两种不同纹理材质的混合,可得到雕刻模型的PBR材质(如图12)。

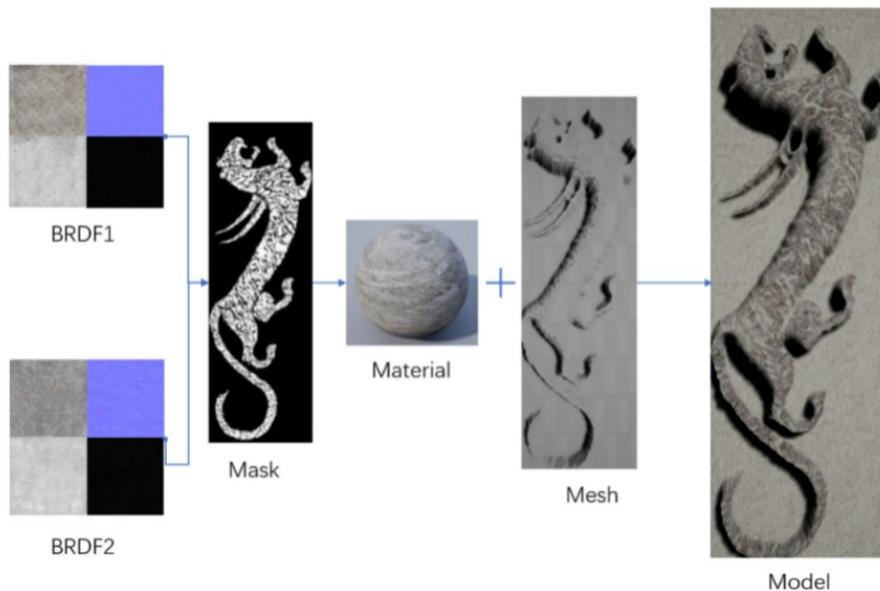


图12 材质混合流程

5.2.2 细节法线增强

为增强雕刻模型中主体与背景接触的边缘部分的细节表现,本文利用高度图计算法线贴图,以增强细节部分的表现效果。有如下三种方法:

方法1 相邻点采样法

该方法是最简单常用的方式,通过计算高度图 H 中每个像素点在UV切向空间中 S 和 T 方向的倾斜向量之间的叉乘,得到各点的法向量。

$$S(i,j) = (1, 0, H(i+1,j) - H(i-1,j)) \quad (10)$$

$$T(i,j) = (1, 0, H(i,j+1) - H(i,j-1)) \quad (11)$$

$$N(i,j) = \frac{S(i,j) \times T(i,j)}{\|S(i,j) \times T(i,j)\|} = \frac{(-S_z, -T_z, 1)}{\sqrt{S_z^2 + T_z^2 + 1}} \quad (12)$$

由于该方法在计算时需要进行四次贴图采样并且进行叉乘运算,因此算法效率较低。

方法2 Sobel算子法

Sobel算子是一个离散微分算子,用于计算图像强度函数梯度的近似值,可利用Sobel算子计算像素在两个方向的梯度模拟法线表现。其运算符是两个各向同性的 3×3 算子,其中 \mathbf{O}_x 用于提取图像水平变化, \mathbf{O}_y 用于提取图像垂直变化。

$$\mathbf{O}_x = \begin{bmatrix} +1 & 0 & -1 \\ +2 & 0 & -2 \\ +1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \mathbf{O}_y = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

由于高度图为单通道图像,因此可以利用Sobel运算得到的两个方向梯度作为 X 、 Y 方向法线强度。

$$G_x = \mathbf{O}_x * H, G_y = \mathbf{O}_y * H \quad (14)$$

$$N(i,j) = (G_x(i,j), G_y(i,j), s) \quad (15)$$

其中 $s(0 \leq s \leq 1)$ 用于控制法线贴图的强度。

方法3 高度图偏移法^[21]

呈现凹凸细节的一般为山脊结构或者山谷结构,可以根据中线把高度分为亮部和暗部两部分。高度图偏移法利用原高度图与其在 U 、 V 方向偏移的高度图做差,将其作为对应方向的偏移值,得到对应法线。

$$N_U = (H - H_{offsetU}) * s \quad (16)$$

$$N_V = (H - H_{offsetV}) * s \quad (17)$$

$$N(i,j) = (Grey(N_U(i,j) + 0.5), Grey(N_V(i,j) + 0.5), 1) \quad (18)$$

其中 $H_{offsetU}$ 、 $H_{offsetV}$ 为高度图分别在 U 、 V 方向进行部分偏移后重新采样得到的高度偏移图, $Grey(I)$ 为合并通道操作,将RGB三通道合并为常量值。



(a)无增强效果



(b)方法1增强效果



(c)方法2增强效果



(d)方法3增强效果

图13 细节增强方法对比

图13 b框选区域可以观察到方法1的过度不够平滑,并且伴有波纹形状的噪声产生。图13 c可以观察到方法2虽然不存在波纹状噪声,但是仔细观察可以发现会有明

显的颗粒状噪声。图13 d可以观察到方法3取得了较好的效果,法线效果过度较为平滑,并且在框选区域中面对光源的方向上也可以分辨出模型不同区域的边缘部分。

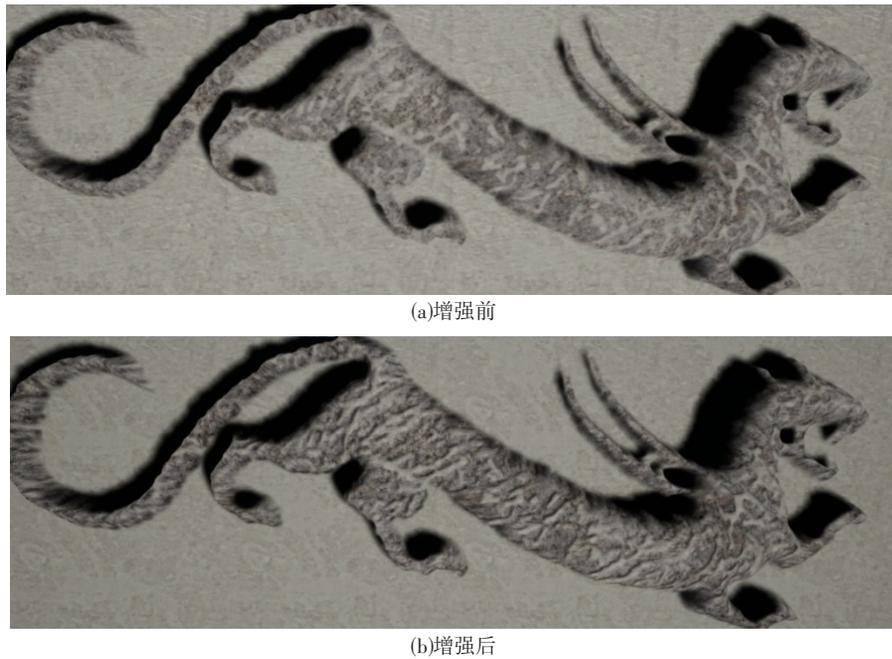


图14 雕刻模型细节增强效果

6 实验结果

如图15所示,给出了线稿图像三维化结果。Kolomenkin M法^[2]主要关心线稿的曲线区域高度,虽然生成的三维化结果可以对线稿图像中的曲线走

向以及曲线处对应的细节进行保留,但是对于不同区域之间的高度关系并不能进行合理计算。本文提出的方法不仅对曲线处的细节进行了增强而且生成的模型结果可以明显地看出不同区域之间的高度关系。



图15 线稿图像三维化结果

如图16所示,给出了拓片图像三维化结果。Li Z法^[10]对于细节部分的还原分为两部分,首先利用拓片反相图像作为初步高频估计,然后再手动增加高频细节。为确保实验对照有效,在实验对比中仅使用其第一步结果。实验中拓片图像大小为 836×1043 ,以三角面个数为433680的网格面作为基面进行三维网格

生成。对生成后的网格进行QEM简化,通过设置QEM简化中二次测量之间的距离误差阈值来保证简化程度相同。Li Z法得到的模型简化后为228605个三角面,本文方法得到的模型简化后为161987个三角面,本文算法在保证细节的同时可以对模型进一步简化以减少数据量。

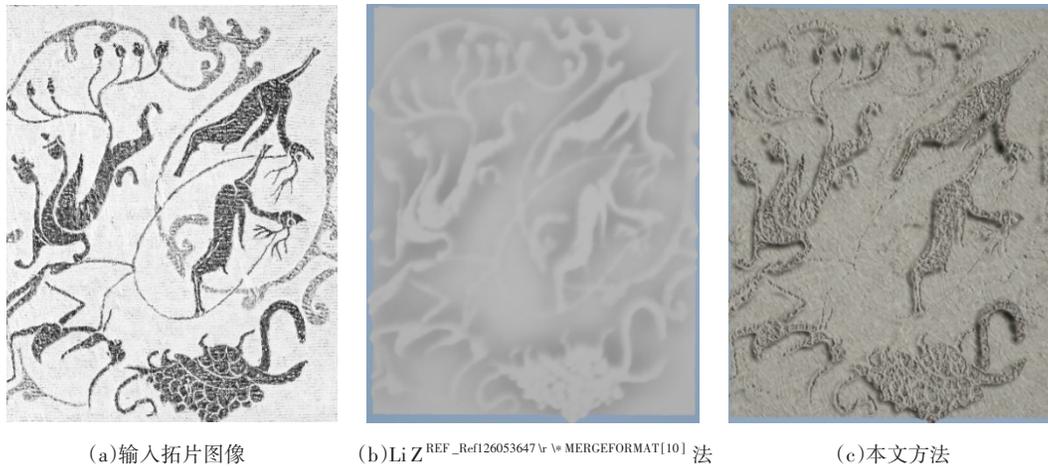


图16 拓片图像三维化结果

受Zhang T^[11]工作启发,本文进一步在碑刻数据上进行实验。如图17所示,给出了对书法碑刻图像进

行碑匾阳刻和阴刻的复原实验,在模型生成步骤中可以通过指定高度方向以调整阴刻网格生成的效果。



图17 书法碑刻复原实验

7 结论

本文结合现实中雕刻作品的制作步骤,以及雕刻作品中细节的表现手法,提出了通过分离雕刻模型主体与材质的方式来优化雕刻模型的生成。利用雕刻模型的材质部分来表现雕刻的细节,然后对生成的三维网格进行优化以减小生成模型的数据量,使用该算法最终获得的三维雕刻模型细节表现更加丰富且数据量更小。

参考文献(References):

- [1] Zheng S. The graphical techniques of shoushan stone carving[M]. Fujian :Fujian Art Publishing House, 2010.
- [2] Kolomenkin M , Leifman G , Shimshoni I , et al. Reconstruction of relief objects from line drawings[C]// Computer Vision & Pattern Recognition. IEEE, 2013.
- [3] Sýkora D, Kavan L, Čadík M, et al. Ink-and-ray: Bas-relief meshes for adding global illumination effects to hand-drawn characters [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2014, 33(2): 1-15.

- [4] Entem E, Barthe L, Cani M P, et al. Modeling 3D animals from a side-view sketch[J]. *Computers & Graphics*, 2015, 46: 221-230.
- [5] Dvorožňák M, Nejad S S, Jamriška O, et al. Seamless reconstruction of part-based high-relief models from hand-drawn images[C]//*Proceedings of the Joint Symposium on Computational Aesthetics and Sketch-Based Interfaces and Modeling and Non-Photorealistic Animation and Rendering*. 2018: 1-9.
- [6] 夏梦, 张荣, 彭韧等. 用线描图生成唐卡浮雕[J]. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49(02):216-228.
- [7] Zeng Q, Martin R R, Lu W, et al. Region-based bas-relief generation from a single image[J]. *Graphical Models*, 2014, 76:140-151.
- [8] Wu T P, Sun J, Tang C K, et al. Interactive normal reconstruction from a single image[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2008, 27(5): 1-9.
- [9] Governi L, Carfagni M, Furferi R, et al. Digital bas-relief design: A novel shape from shading-based method[J]. *Computer-Aided Design and Applications*, 2014, 11(2): 153-164.
- [10] Li Z, Wang S, Yu J, et al. Restoration of brick and stone relief from single rubbing images[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2011, 18(2): 177-187.
- [11] Zhang T, Zhang L, Yu J. Computer generation of 3D inscriptions from 2D images of Chinese calligraphy[J]. *Jisuanji Xuebao/Chin. J. Comput.*, 2014, 37(11): 2380-2388.
- [12] Zhang Y W, Chen Y, Liu H, et al. Modeling Chinese calligraphy reliefs from one image[J]. *Computers & Graphics*, 2018, 70: 300-306.
- [13] Deschaintre V, Aittala M, Durand F, et al. Single-image svbrdf capture with a rendering-aware deep network[J]. *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, 2018, 37(4): 1-15.
- [14] Deschaintre V, Aittala M, Durand F, et al. Flexible svbrdf capture with a multi-image deep network[C]//*Computer graphics forum*. 2019, 38(4): 1-13.
- [15] Gao D, Li X, Dong Y, et al. Deep inverse rendering for high-resolution SVBRDF estimation from an arbitrary number of images[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2019, 38(4): 134: 1-134:15.
- [16] Guo Y, Smith C, Hašan M, et al. MaterialGAN: Reflectance capture using a generative SVBRDF model[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2020, 39(6): 1-13.
- [17] Zhang T Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns[J]. *Commun. ACM*, 1997, 27(3): 337-343.
- [18] Garland M, Heckbert P S. Surface simplification using quadric error metrics[J]. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1997, 1997:209-216.
- [19] Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation[J]. *arXiv preprint arXiv:1505.04597*, 2015.
- [20] Allegorithmic. Substance [DB/OL]. <https://share.allegorithmic.com>, 2018.
- [21] Wataru Ikeda. Creative and Experimental VFX in 'The Last of Us Part II' [R/OL]. <https://www.gdcvault.com/play/1027072/Creative-and-Experimental-VFX-in>, 2021.

编辑:龙学锋

(上接第8页)

- [9] Ioushua S S, Eldar Y C. Pilot sequence design for mitigating pilot contamination with reduced RF chains[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(6): 3536-3549.
- [10] Shen K, Cheng H V, Chen X, et al. Enhanced channel estimation in massive MIMO via coordinated pilot design[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(11): 6872-6885.

编辑:龙学锋