

面向青铜器的建模与绘制

胡晏秋¹⁾ 于金辉^{1)*} 姜威²⁾ 彭翱³⁾

¹⁾(浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室 杭州 310058)

²⁾(杭州电子科技大学机械工程学院 杭州 310018)

³⁾(浙江大学计算机科学与技术学院数字媒体系 杭州 310027)

(huyanqiu@cad.zju.edu.cn)

摘要 提出一种青铜器三维模型建模与绘制的系统方法。首先把青铜器三维模型导入系统,然后根据几何特征对模型进行分割和融合,并提供交互工具对模型进行特殊形状区域分割,根据不同形状的分隔区域采用修正的参数化方法,以保证映射绘制的青铜器饰纹没有扭曲;最后结合法向映射、纹理融合、图像扩散等技术表现青铜器表面饰纹的起伏以及锈蚀效果。该系统在绘制时利用了 GPU 的并行性和可编程性,可达到近似实时的绘制速度。利用文中系统,用户只需进行简单的交互操作就可以改变青铜器上饰纹的排列以及锈蚀效果的变化,该系统在数字博物馆、数字图书馆、青铜器装饰产品设计、美术教育等领域具有广泛的应用前景。

关键词 建模; 绘制; 分割; 锈蚀; 青铜器

中图分类号 TP391

Modeling and Rendering of Bronze Articles

Hu Yanqiu¹⁾ Yu Jinhui^{1)*} Jiang Wei²⁾ Peng Ren³⁾

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

²⁾(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018)

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

Abstract A system for modeling and rendering of the bronze articles is introduced. First, we import the three dimensional mesh model and segment the model into regions by use of geometric features. Next, we parameterize these regions by modifying existing parameterization method to ensure the patterns mapped without distortion. Finally, the relief surface and the corrosion effects on the bronze articles are simulated through normal mapping, multiple texture blending and dilation techniques. We accelerate rendering by taking advantage of the parallelism and programmability of GPU. Through UI users are able to alter the arrangements of the patterns and corrosion effects with ease. Potential applications of our system are digital museum, digital library, design of decorative products with bronze features, and art education.

Key words modeling; rendering; segmentation; corrosion; bronze articles

中国传统图形资源极为丰富,如商代青铜器上的饕餮图形,春秋战国时期的蝌蚪文、梅花篆,汉代漆器上的凤形,唐代的宝相花纹以及后来出现的金文等。

这些图形随着历史的发展而不断地沉淀、延伸、衍变,形成中国特有的传统艺术体系,它凝聚了中华民族几千年的智慧精华,体现出华夏民族特有的艺术精神,

收稿日期:2007-07-18。基金项目:国家自然科学基金(60673007);国家“八六三”高技术研究发展计划(2006AA01Z312);浙江省科技计划项目(2007C21043)。胡晏秋,男,1984年生,硕士,主要研究方向为非真实感绘制、GPU绘制。于金辉,男,1960年生,博士,研究员,博士生导师,论文通讯作者,主要研究方向为计算机动画、计算机游戏、数字艺术(jhyu@cad.zju.edu.cn)。姜威,男,1985年生,硕士,助教,主要研究方向为产品系统设计、界面交互设计、多媒体设计。彭翱,男,1965年生,学士,副教授,主要研究方向为数字化艺术设计。

具有极高的审美价值、文化价值和应用价值。

近年来,一些学者开始利用计算机图形技术对传统图形艺术进行研究和再现,但总体上国内外对于不同民族传统图形的建模研究报道不是很多。Kaplan 等^[1]通过群论对伊斯兰星形图案的应用做了深入和细致的讨论,主要通过对称群来分析伊斯兰星形图案的结构和组织形式;Raghavachary 用图论描述了印度 Kolam 图案的生成规则^[2]。Liu 等把圆形对称的剪纸图案进行扇形二分、四分或六分,然后合成新的中心对称剪纸图案^[3],张显全等提出用样条曲线生成中国动物剪纸图案的方法^[4],Li 等进一步把剪纸图案绘制到三维模型上^[5],Xu 等用图像合成的方法生成剪纸效果^[6]。

青铜器的造型庄重典雅,其分类主要从器形和饰纹两方面进行,常见的器形有鼎、鬲、甗、簋、觚、爵、卣、觶、罍、盃、盘等,常见的饰纹有饕餮纹、窃曲纹、蝉纹、蟠螭纹、三角纹和乳丁纹等,它们在青铜器表面上还有类似浮雕的凸凹起伏,这种起伏在上述伊斯兰星形图案和剪纸纹样绘制过程中是不需要考虑的。刘晓等^[7]和吴伟波等^[8]用三维扫描仪对青铜器扫描建立其模型,但这种方法只能实现和青铜器

实物一一对应的建模,用户无法对青铜器模型进行调控处理,如改变青铜器表面图案的形状以及排列等。实际上在古代青铜器某一器形(比如鼎)中,每个鼎在外形上可以相同或高度近似,但其表面的饰纹设计与排列都是变化的。如果我们能够在青铜器模型上改变饰纹的排列,就可以避免三维扫描青铜器带来的一一对应的局限,实现把多种饰纹绘制到多种器形上的目标。

为此,本文提出一个面向青铜器的建模和绘制方法,并实现了一个青铜器绘制系统。该系统的输入是一个不带表面饰纹细节的三维网格模型,根据区域几何特征对输入模型进行区域分割,并根据饰纹几何特征对其进行不同的参数化处理;然后在参数化区域上调整饰纹排列,结合法向映射和纹理融合等技术来实现青铜器纹的凸凹绘制;最后加入可控的青铜器表面锈蚀效果。

1 系统框图

本文系统的框图如图 1 所示,其中带有 * 号的模块提供了便利的交互式操作。

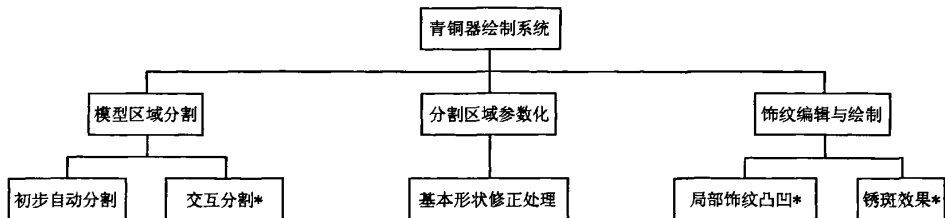


图 1 青铜器绘制系统框图

1) 模型区域分割与处理。根据二面角对青铜器模型进行区域分割,然后利用区域向量对细小分割区域进行合并处理。

2) 参数化处理。根据饰纹的几何特征提供 3 种参数化处理方式:矩形,圆形以及圆环。

3) 饰纹编辑与绘制。提供交互工具实现对饰纹大小以及排列的编辑;然后借助 GPU 并行渲染流水线,利用色彩图、向量图、高度图、锈斑控制图以及锈斑图进行图像融合;最后生成具有凸凹感的锈蚀效果。

2 区域分割

本文系统中需要青铜器的三维网格模型,我们请三维美工用 3D Max 等软件设计出青铜器物的三

维模型,但没有表面凸凹的饰纹。这样的模型面片数量较少,避免了极其繁复的青铜器表面饰纹建模,更关键的是通过这种方式把青铜器物形和饰纹分开,可以在同一物形的青铜器模型上绘制不同的饰纹,实现把多种饰纹绘制到多种器形上的目的。

青铜器饰纹往往是由多种不同图案组合而成的,其组合方式有的简单,有的复杂;有些饰纹呈对称性,有些则不具备对称性。为了在青铜器模型表面绘制各种饰纹,首先需要对模型表面进行区域分割。由于青铜器在器物形态上其几何造型相对简单,可采用文献[9-10]的方法对模型表面进行分割。该方法的主要思想是计算网格模型上每个边对应的 2 个相邻面片之间的夹角,并对它们进行大小排序,然后挑出大于某阈值的那些边,利用广度优先遍历生成各个分割区域。

用上述方法进行初步分割后会产生一些细小的区域,需要将其合并得到较为完整的大区域.设某区域 C_m 上某个面片 p_i ,其法向量为 n_i ,其面积由方程 $S_i(x, y, z)$ 决定,其在 X, Y 和 Z 轴上的定义域分别为 E_{x_i}, E_{y_i} 和 E_{z_i} ,则 C_m 的平均向量为

$$MV_{C_m} = \frac{\sum_{p_i \in C_m} \left(n_i * \int_{x \in E_{x_i}} \int_{y \in E_{y_i}} \int_{z \in E_{z_i}} S_i(x, y, z) \right)}{\sum_{p_i \in C_m} \int_{x \in E_{x_i}} \int_{y \in E_{y_i}} \int_{z \in E_{z_i}} S_i(x, y, z)} \quad (1)$$

然后设定一个阈值,遍历分割区域后选出面片数少于阈值的区域,计算该区域平均向量与相邻面片向

量的差异度(即2个向量标准化后的点乘),从中选出具有最小差异度的那个面片,并将该面片所在区域和当前区域合并.

由于青铜器饰纹在器物上不同位置可以有不同的形状,因此我们在系统中提供一些交互工具,用户可以方便地在模型上交互分割出所需的区域.如图2所示,若要在图2a所示的器物上得到一个圆形区域,用户只需要在模型上指定少量离散点,则系统会按照最小路径准则勾勒出一个如图2b所示的圆形线,然后分割出如图2c所示的圆形区域.

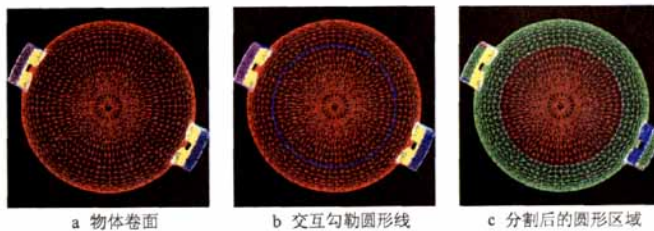


图2 交互式分割区域

3 分割区域参数化处理

绝大多数青铜器的饰纹在青铜器表面的分布具有一定的规则性,归纳起来可以分成矩形、圆形以及环形.我们对分割区域的参数化处理要保证后期映射的饰纹具有正确的对称性、方向性和大小.如果仅仅对上述不同的分割区域采取通用的参数化处理,有时候难以保证饰纹映射后的对称性、方向性和大小.为了解决这些问题,我们先把分割区域按照文献[9-11]中基于最小二乘的保角映射方法进行初步参数化,得到参数化平面区域后,系统对其进行平移、旋转以及缩放修正处理.下面先定义3种基本操作:

1) 平移. $Translate(a, b)$ 代表物体沿笛卡儿坐标系 x 轴, y 轴移动 a, b 个单位的操作矩阵.

2) 旋转. $Rotate(x, y, \theta)$ 代表物体沿 (x, y) 点旋转 θ° 的操作矩阵.

3) 缩放. $Scale(a, b)$ 代表物体沿笛卡儿坐标系 x 轴, y 轴缩放的操作矩阵,其缩放因子分别是 a, b .

3.1 矩形分割区域的参数化修正处理

设矩形分割区域的4个顶点坐标分别是左下角 (x_0, y_0, z_0) , 右下角 (x_1, y_1, z_1) , 右上角 (x_2, y_2, z_2) 和左上角 (x_3, y_3, z_3) , 初步参数化后的点为 $(a_0,$

$b_0)$, (a_1, b_1) , (a_2, b_2) 和 (a_3, b_3) . 设纹理空间左下角为 $(0, 0)$, 右上角为 $(1, 1)$.

设矩形中的任意一点坐标 (x, y, z) , 假设它基本参数化后的坐标为 (a, b) , 则它修正处理后的纹理坐标为

$$(T_x, T_y) = (a, b) * Translate(-a_0, -b_0) * Rotate(0, 0, -\theta) * Scale(t, 1) \quad (2)$$

其中, θ 为平移操作后向量 $(a_1 - a_0, b_1 - b_0)$ 与 x 轴的夹角, t 为前两步转换之后模型 y 轴方向最大值 b_{max} 与最小值 b_{min} 的比值, 即 $t = b_{max}/b_{min}$.

3.2 圆形分割区域的参数化修正处理

设圆形区域上某点 d_i 经初步参数化后的坐标为 (a_i, b_i) , 设该区域共有 n 个点, 则这个圆的近似圆心为

$$a_{mid} = (a_{max} + a_{min})/2; \\ b_{mid} = (b_{max} + b_{min})/2 \quad (3)$$

半径为

$$r = (\max(a_i) - \min(a_i))/2 \quad (4)$$

设圆形纹理空间为 $(0.5, 0.5)$ 为圆心、半径为 0.5 的区域, 则圆上对应 d_i 点的修正后纹理坐标为

$$(tx_i, ty_i) = (a_i, b_i) * Translate(-a_{mid} + 0.5, -b_{mid} + 0.5) * Scale(r/0.5, r/0.5) \quad (5)$$

3.3 环形区域的参数化处理

一些圆形青铜器中有些饰纹呈环状分布, 如果对青铜器模型上切割下来的环形区简单地应用保角

参数化会产生弯曲的条状区域,其边缘也不整齐,饰纹经映射后会产生如图 3 a 所示的扭曲.为了避免这种扭曲,我们在系统中直接用圆柱面来对环形区域进行参数化,具体过程如下:

Step1. 先在分割的环形区域上纵向指定一个参考线,该纵向对应环形区的“宽度”,如图 3 b 中蓝色线所示,将蓝线上各个点映射到一个长方形 *Rct* 的第一列上.

Step2. 沿着该区域的一个边缘线的切线方向(如图 3 b 中红色箭头所示)寻找下一个点,并以此点为参考再沿纵向寻找各个点,将它们映射到 *Rct* 的第二列上.以此方式直至所分割的环形区域全部映射到 *Rct* 上,该 *Rct* 就是所要的环形区域参数化平面,如图 3 b 下端所示,用它映射的饰纹避免了保角映射时可能产生的扭曲(如图 3 c 所示).

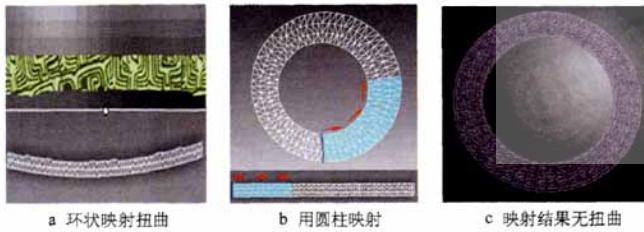


图 3 环状区域参数化处理

4 饰纹的绘制

青铜器饰纹绘制包括饰纹凸凹的表现和锈蚀效果的绘制两部分.

4.1 饰纹凸凹绘制

青铜器饰纹在青铜器表面上有类似浮雕的起伏,由于各种饰纹形状复杂,如果用网格重构的方法在几何上表示饰纹的起伏会造成网格面片数量骤增,因此我们采用纹理映射方法来表现饰纹的起伏.已经有多种绘制起伏纹理的算法,如凸凹映射^[12]、法向映射^[13]、relief mapping^[14] 以及 indirection mapping^[15]等,综合考虑模型精度和速度,我们采用法向映射方法绘制青铜器饰纹的起伏效果.

在法向映射方法中需要一张纹理图和法向图,其中法向图可以通过高精度模型获得,也可以通过高度图近似获得.由于我们没有青铜器的高精度模型,所以只能用高度图近似获得,其方法如下:

扫描若干青铜器饰纹的黑白图像,然后对它们进行高斯滤波,得到饰纹的高度图.在给定高度图纹理的垂直上方取样,设其差分向量为 Δy ,水平右方取样,设其差分向量为 Δx ,则其法向量是 2 个差分

向量叉乘后的归一化向量

$$normal = normalize(\Delta x \otimes \Delta y) \quad (6)$$

如图 4 所示,从左到右分别给出纹理图、高度图、法向图以及经过混合后得到的法向映射效果图.为了提高系统的绘制速度,我们利用 OpenGL 着色语言(GLSL)编写顶点和片段着色器来实现 GPU 并行运算.



图 4 法向映射效果

4.2 纹理的锈斑生成

青铜器由于长期经历不同的环境条件而产生锈斑,锈斑形状、大小均随机变化,分布位置也不固定,有的锈斑还与饰纹起伏位置有关.因为外界因素过于复杂,通过物理方法真实地模拟青铜器锈斑是一件十分困难的事情.

本文系统中构造出青铜器表面没有锈斑的纹理图 C_0 、以锈斑颜色为主的纹理图 C_1 、控制锈斑位置的模板图 C_m 以及饰纹高度图 C_h ;然后通过

$$C = C_0 * (\delta - h) + C_1 * (1 - \delta + h) \quad (7)$$

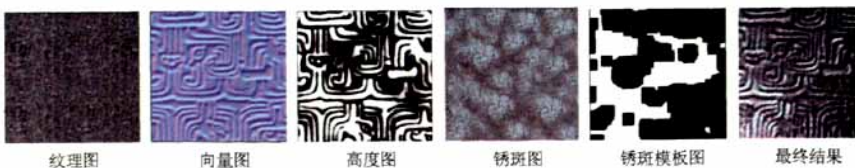


图 5 锈斑纹理生成

对 C_1 和 C_2 进行纹理融合,得到如图 5 所示的最终纹理效果 C . 其中, h 是高度图上的高度值, δ 为可调阈值, 在 $h < \delta$ 以及当前像素落入 C_m 时, 锈斑可见.

为了进一步控制锈斑的大小或锈蚀程度, 我们在系统中提供了一个基于随机膨胀运算的模块供用户模拟不同锈蚀情况. 先定义一个 3×3 的矩阵 D 来表示锈斑的 8 个膨胀方向, 再定义一个随机函数来产生 $1 \sim 10$ 整数值; 设定一个阈值 ϵ , 如果随机数大于 ϵ 且 D 中某些方向的值为真, 则锈蚀在该方向膨胀, 结果如图 6 示, 其中从左到右锈蚀程度逐渐增大.



图 6 锈斑腐蚀程度逐渐加大的效果图

5 绘制结果

本文系统在 P IV 2.4 GHz, 512 MB 内存, NVIDIA 5700 显卡, Window XP 操作系统下实现, 开发软件为 Visual C++.net 2005, 利用 OpenGL

和 GLSL 绘制模型. 整个系统界面如图 7 所示, 其中, 界面左端是系统主窗口, 显示和编辑三维模型; 界面右端上侧是参数化方式选择, 其下端是全局纹理映射控制区, 用户可以选择图像纹理对模型表面进行全局映射; 在全局纹理映射区的下面是纹理映射控制区, 用户可以对青铜器的饰纹映射进行调整, 包括对纹理图像的平移、旋转、缩放、饰纹表面凸凹、锈斑出现以及锈蚀程度控制等操作. 图 7 给出我们在一个正方体模型上绘制青铜器饰纹的结果.

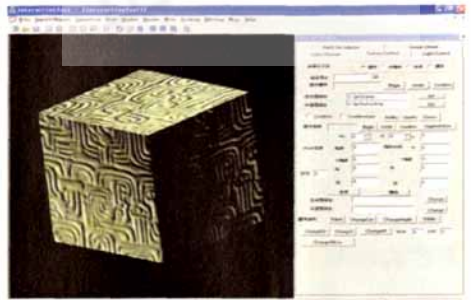


图 7 系统界面及正方体绘制结果

下面展示在 2 个青铜器模型上绘制的效果. 图 8 所示为一个双耳鼎青铜器模型; 图 9 所示的模型是一个壶状青铜器, 图 9 a, 9 b 中的右图为左图局部效果图.



a 未加入锈蚀的效果 b 加入锈蚀的效果 c 加入锈蚀效果局部显示

图 8 双耳鼎青铜器绘制效果



a 相同的饰纹绘制 b 不同的饰纹绘制

图 9 在壶状青铜器表面绘制不同饰纹

6 总结与工作展望

本文提出一种面向青铜器建模与绘制的方法,把青铜器的器物形态和青铜器饰纹分开,从而实现了把多种饰纹绘制到多种青铜器物上的目标.针对青铜器饰纹的形状特征提出三维模型面片区域参数化修正方法,解决了保角映射参数化带来的扭曲失真问题.本文系统界面友好,用户可以方便地对三维模型进行初步自动分割以及交互细化分割;此外还可以对映射的饰纹进行排列编辑,以达到用户所希望的绘制效果.本文工作在数字博物馆、数字图书馆、青铜器装饰产品设计、美术教育等领域具有广泛的应用前景.

目前我们实现的系统中饰纹是图像的,用户只能以图像为基础在青铜器的器物模型上进行饰纹的安排与调控.在未来的工作中,我们打算对各种青铜器饰纹单元建立其矢量化模型,在矢量化模型基础上用户可以实现对不同饰纹单元进行组合,从而绘制出更富有变化的饰纹.

参 考 文 献

- [1] Kaplan C S, Salesin D H. Islamic star patterns in absolute geometry [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, 23 (2): 97-119
- [2] Raghavachary S. Tile-based kolam patterns [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Los Angeles*, 2004: 58
- [3] Liu Y X, Hays J, Xu Y Q, *et al.* Digital papercutting [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Los Angeles*, 2005: Article No. 99
- [4] Zhang Xianquan, Yu Jinhui, Jiang Linglin, *et al.* Computer assisted generation of paper cut out images [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17 (6): 1378-1382 (in Chinese)
(张显权, 于金辉, 蒋凌琳, 等. 计算机辅助生成剪纸形象 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(6): 1378-1382)
- [5] Li Y, Yu, J H, Ma K L, *et al.* 3D paper-cut modeling and animation [J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2007, 18(4): 395-403
- [6] Xu J, Kaplan C S, Mi X F. Computer-generated papercutting [C] // *Proceedings of the 15th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, Maui*, 2007: 343-350
- [7] Liu Xiao, Wu Xunwei. Computer-rebuilding damaged cultural relics in three dimensions [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2001, 23 (7): 650-656 (in Chinese)
(刘晓, 吴训威. 破损古文物的计算机三维重构 [J]. *电子与信息学报*, 2001, 23(7): 650-656)
- [8] Wu Weibo, Cao Wenjun. The research and implementation of some key technology to building a digital museum [J]. *Journal of Fudan University: Natural Science*, 2001, 40(6): 649-652 (in Chinese)
(吴伟波, 曹文君. 对于数字化博物馆实现中的一些关键技术的研究与实践 [J]. *复旦学报: 自然科学版*, 2001, 40(6): 649-652)
- [9] Lévy B, Petitjean S, Ray N, *et al.* Least squares conformal maps for automatic texture atlas generation [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Los Angeles*, 2002: 362-371
- [10] Hubeli A, Gross M. Multiresolution features extraction from unstructured meshes [C] // *Proceedings of IEEE Visualization Conference, Brisbane*, 2001: 287-294
- [11] Haker S, Angenent S, Tannenbaum A, *et al.* Conformal surface parameterization for texture mapping [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2000, 6(2): 181-189
- [12] Peercy M, Airey J, Cabral B. Efficient bump mapping hardware [C] // *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Atlanta*, 1997: 303-306
- [13] Robinson S M. Normal maps induced by linear transformations [J]. *Mathematics of Operations Research*, 1992, 17(3): 691-714
- [14] Oliveira M M, Bishop G, McAllister D. Relief texture mapping [C] // *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Los Angeles*, 2000: 359-368
- [15] McGuire M, Whitson K. Indirection mapping for quasi-conformal relief texturing [C] // *Proceedings of the 2008 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, Washington*, 2008: 191-198