

基于视觉曲率估算的文物线图绘制方法

刘 军^{1,2,4} 周明全^{2,3} 耿国华^{1,2} 沈映泉¹

(西北大学信息科学与技术学院 西安 710027)¹

(文化遗产数字化国家地方联合工程研究中心 西安 710027)²

(北京师范大学信息科学与技术学院 北京 100875)³

(渭南师范学院网络安全与信息化学院 渭南 714099)⁴

摘要 针对表面富含噪声的文物三维模型特征线的有效提取问题,分析了预处理阶段导致纹理细节丢失的原因,提出了一种基于视觉曲率估算的文物线图自动绘制方法。首先,对三角网格模型顶点的高度函数空间进行均匀采样,通过统计高度函数中极值点的个数,实现对模型顶点的视觉曲率估算;然后,根据多尺度约束下模型顶点的视觉曲率分布,将模型划分为平坦区域和特征区域;接着,依据考古领域均值对特征区域的顶点进行锐化滤波,计算出新的三角网格模型的顶点坐标;最后,对三角网格模型提取特征轮廓线,实现对文物线图的自动绘制。实验结果表明,基于视觉曲率的特征轮廓线在保留文物模型表面纹理细节的同时,有效避免了简单脊线/谷线法绘制线图呈现的尖锐现象。

关键词 文物,线图,三维模型,视觉曲率,特征轮廓线

中图法分类号 TP391 文献标识码 A

Drawing Method of Cultural Relics Line Drawing Based on Visual Curvature Estimation

LIU Jun^{1,2,4} ZHOU Ming-quan^{2,3} GENG Guo-hua^{1,2} SHEN Ying-quan¹

(School of Information and Technology, Northwest University, Xi'an 710027, China)¹

(Cultural Heritage Digital Engineering Research Center, National Development and Reform Commission, Xi'an 710027, China)²

(College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)³

(School of Information and Technology, Weinan Normal University, Weinan 714099, China)⁴

Abstract In order to solve the problem of the effective extraction of the feature lines of the three-dimensional model whose surface has noise, the reasons for the loss of texture details in the preprocessing stage was discussed and a new method of line drawing based on visual curvature estimation of the cultural relics was proposed. First, the discrete curvature on triangular mesh vertex is estimated and the cultural relic model is divided into the flat region and the non-flat region according to the curvature distribution. Then the sharpening filter on the vertex of the non-flat region is conducted to calculate the new mesh vertex coordinates. Finally, based on the visual curvature, the curved contour line is extracted to achieve automatic drawing of line drawing of cultural relics of the triangular mesh model. The experimental results show that the non-flat contour lines based on the visual curvature remains the details of the surface texture of the 3D model and avoid the sharp phenomena of the line drawing of the directed ridge line & valley line drawing.

Keywords Cultural relics, Line drawing, 3D model, Visual curvature, Feature contour line

1 引言

考古绘图是文物保护的一项基础工作。考古发掘过程中,考古工作者需要对文物碎片进行线图绘制,刻画文物的大小、形状、结构、花纹和质地。高质量的文物线图可用于发掘报告插图、论文插图、专著、教科书插图以及展览图表等,具有档案存储、辅助文物修复和保护、考古研究以及文化出版等功能^[1]。传统的正投影手工方法要在手工拉基线、张网格以及用尺子选点测量的基础上,依靠测量值进行文物线图绘制,如图 1 所示。整个过程工序多,绘制速度慢,图形精度低,绘图质量因人而异。尤其是线图绘制过程中,考古工作者要对文

物不断地进行翻转、测量,极易对存在裂纹的文物造成二次损伤。



(a) 基线法

(b) 网格法

图 1 传统的考古线图手工绘制方法

本文受国家自然科学基金(61373117, 61673319), 陕西省自然科学基金(15JK1247), 渭南师范学院自然科学重点项目(17YKF02)资助。

刘 军(1973—),男,博士生,CCF 会员,主要研究方向为文化遗产数字化保护, E-mail: wnliujun@163.com;周明全(1954—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为智能信息处理、数据库与知识库、图形图像处理;耿国华(1955—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为智能信息处理、图形图像处理;沈映泉(1987—),女,硕士,主要研究方向为计算机图形学。

为提高绘图的效率和质量,考古部门尝试利用数字摄影技术进行线图绘制。首先,将要描绘线图的文物放置于特定环境下进行数码拍摄。然后,将拍摄获得的优质文物照片导入 Photoshop, CorelDraw 等图形处理软件,采用人机交互式标记出文物轮廓线,应用抠图技术将文物与背景分离。接着,对抠出的文物图像进行去色,使之变为黑白图,再经过去噪、风格化等处理,最终获得文物的线画图。这种方法在拍摄时要求文物的背景必须是纯色,与所拍摄的文物主色调有明显的反差;照射灯光需要漫射光或者自然光,以保证文物上的明暗光影对比不太强烈。实际上,野外作业很难获得文物的正投影图像,加之手工抠图费时耗力,这种方法应用范围有限。

近年来,基于轮廓检测与提取的方法开始应用于文物线图的自动绘制。典型的方法有基于图像的边缘检测、基于图像的非真实感绘制和基于物体空间的轮廓线检测这 3 类^[2]。项目组在工程实践中发现,直接使用的 Sobel, Prewitt, Log 和 Canny 等经典算子对文物的数字图像进行边缘检测,提取到的特征线噪声多、不连贯,效果并不理想,如图 2 所示。基于图像的非真实感绘制方法,通过构建边缘切线流来得到滤波器的积分区域,能够较好地保护图像中具有方向性特征的结构,保证输出的特征线连贯。该方法提取的文物特征线比较连贯,但模型的平坦区域保留了过多与线图绘制无关的特征线,如图 3 所示。

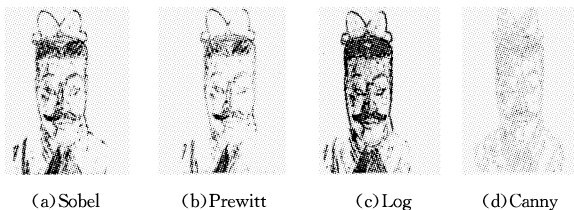


图 2 经典算子的文物特征提取实验效果

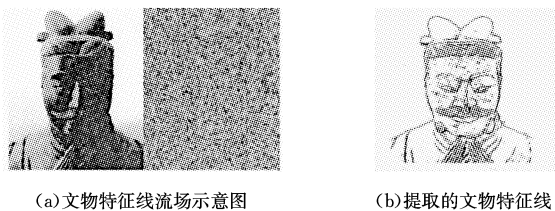


图 3 非真实感绘制文物特征线的实验效果

基于物体空间的轮廓线检测算法的前提是在点云数据基础上建立的文物三维模型。直接检测法通过遍历三维模型的每一条边或每一个三角面,来检测这条边是否属于轮廓线或该三角面片是否有轮廓线经过。当观察者视点改变时,必须重新计算所有轮廓线。对于非静止状态的三维模型,该算法的效率很低。随机检测算法针对具有局部连续性的模型或当视点发生小变动时具有时间连续性的轮廓线检测,该算法不检测三维模型所有的边。当找到小部分轮廓边之后,判断这部分轮廓边的邻边是否也是轮廓边,然后以递归的方式查找下去,直到查找到的轮廓边数超过阈值。这种算法容易实现、速度快,缺点是不能检测到所有的轮廓边,轮廓线检测的精度低,局部细节或缺失,如图 4 所示。实际上,考古线图主要用于刻画文物的结构和纹理,不同于简单几何意义上的模型特征线提取。现有方法对噪声的过度平滑处理会导致文物三维

模型表面的细节丢失,全局锐化会导致平坦区域保留干扰特征线,而简单的脊线/谷线连接绘制出的线图会呈现尖锐现象,难以适应计算机辅助考古线图绘制的实际要求^[3]。

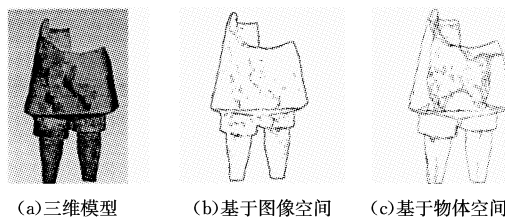


图 4 三维模型轮廓线检测方法的实验效果

2 领域知识

2.1 与视点相关的特征线

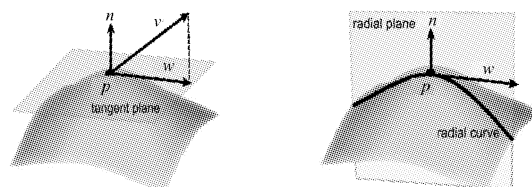
与视线相关的特征线指计算特征线之前需要先确定视点,找到的特征线与视点的位置相关,代表性的特征线如下。

(1) 遮挡轮廓线(Silhouettes Contours)

指曲面上视角方向与法线方向相垂直的点集合。遮挡轮廓线是三维模型可见面与不可见面的分界线,刻画不同角度视点所见的三维模型形状。当视点变化时遮挡轮廓线也将改变,这时需重新计算曲面上视角方向与法线方向的点积。

(2) 启发轮廓线(Suggestive Contours)

给定视线向量 v , 向量 w 为视线向量 v 在曲面上点 p 的切平面上的投影, 向量 w 与法线向量 n 所形成的平面称为径向平面(radial plane), 如图 5(a)所示。径向平面与曲面相交形成一条曲线, 称为径向曲线(radial curve), 径向曲线在点 p 上的曲率称为点 p 的径向曲率(radial curvature), 记为 $k(w)$ 。



(a) w 是 v 在 p 点的切平面上的投影 (b) 径向平面和径向曲率

图 5 主观轮廓线的相关概念

启发轮廓线指曲面上径向曲率为 0 且其在 w 方向上求导大于 0 的点的集合, 表示为:

$$\begin{cases} k(w) = 0 \\ D_w k(w) > 0 \end{cases} \quad (1)$$

启发轮廓线由 Decarlo 于 2003 年提出, 是视线方向轻微改变之后找到的遮挡轮廓线^[4]。启发轮廓线能够反映更多的三维模型细节, 更好地表达三维模型的形状特征。需要指出的是, 该算法找到的启发轮廓线是属于可见区域内的凸区域。

(3) 视脊线(Apparent Ridges)^[5]

视脊线定义为三维模型表面视曲率取值极大值的点的集合。Judd 等人将三维模型表面上的每个点的法向量投影到视平面, 为其上的每个点都定义了视曲率。视曲率可反映出从视点出发三维模型表面上各个点的曲率变化情况, 如图 6 所示。一般而言, 计算这类与视线相关的特征线都需要大量的计算。每当视点改变时, 都需要重新进行与视点相关的曲率计算, 这一过程相当耗时, 而且当三角面片数越多时计算效率越低。

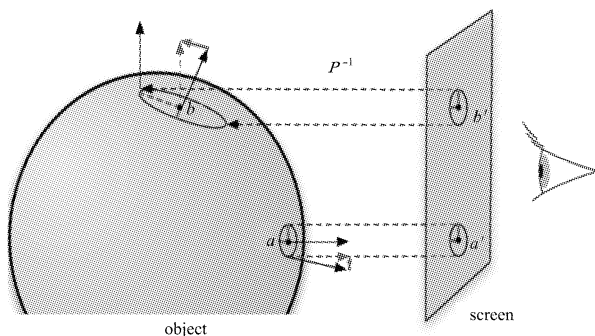


图6 视线率大小图解

2.2 与视点无关的特征线

与视点无关的特征线指计算这类特征线与三维模型本身的几何特征有关,与视点位置无关,代表性的特征线如下。

(1)折缝线(Crease Lines)

折缝线指两个三角面片夹角小于 90°的公共边。如图 7 所示,边 AB 为△ABC 和△ABD 的公共边,如果要判定边 AB 为折缝线,则△ABC 和△ABD 之间的关系应满足式(2):

$$0 < \cos\theta = \frac{n_i \cdot n_j}{\|n_i\| \|n_j\|} < \epsilon < 1 \tag{2}$$

其中,θ为两个相邻三角面片的夹角,ni 和 nj 分别为两个相邻三角面的法矢量,ε 为限定阈值。针对特定类别的文物三维模型,可设定特定的阈值来获得有效的折缝线。

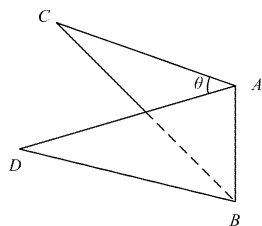


图7 折缝线

(2)边界线(Boundary Lines)

边界线指模型边界最外侧三角面片的边,即只属于一个三角面片的边集合。

(3)脊线(Ridge Lines)和谷线(Valley Lines)

要绘制三维模型的脊线与谷线,首先应确定三维模型的脊点与谷点。

$$\begin{cases} e_{\max} = \partial k_{\max} / \partial t_{\max} = 0 \\ \partial e_{\max} / \partial t_{\max} < 0 \\ k_{\max} > |k_{\min}| \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} e_{\min} = \partial k_{\min} / \partial t_{\min} = 0 \\ \partial e_{\min} / \partial t_{\min} > 0 \\ k_{\min} < -|k_{\max}| \end{cases} \tag{4}$$

其中,kmax 和 kmin 分别为顶点的最大主曲率和最小主曲率,tmax 和 tmin 分别为相应的主方向,emax 和 emin 则称为极系数。

依据式(3)和式(4),三维模型上的点被分为 3 类:脊点、谷点和其他点。满足式(3)条件的点称为脊点,满足式(4)的点称为谷点。通过一定的连接策略,将脊点和谷点连接起来就可得到三维模型的脊线和谷线。

2.3 曲线的视觉曲率

平面曲线的弧长参数化表示 c(s)=(x(s),y(s))具有明显的几何意义。对于曲线上任意一点 v,x(s)代表该点到 y 轴的距离,称为 0°方向的高度;y(s)代表该点到 x 轴的,称为 90°方向的高度。这实际上定义了函数 Hα:C→R,其中 α 代表角度,称为 α 方向的高度函数。

通过旋转坐标轴可获得一系列的高度函数,形成一个函数空间 Ha,该空间具有无穷个高度函数。很显然,不可能处理无穷集合,需要对函数空间 Ha 进行抽样。最常用的方法是均匀抽样,即在 αi=iπ/N(i=0,1,⋯,N-1)处抽样得到 N 个高度函数,组成一个包含 N 个元素的集合{Ha,i=0,1,⋯,N-1}。

图 8(b)~图 8(e)分别是图 8(a)中的五角星轮廓线在 0°,45°,90°和 135° 4 个方向上的高度函数,每个高度函数包含了原曲线的部分信息。对于曲线上的某一个点,它在越多的高度函数中是极值点,则曲线在该点的弯曲程度就越大,因而曲率值应该越大。这个现象说明可以通过计算某点在多少个方向上是极值点来估算曲率。

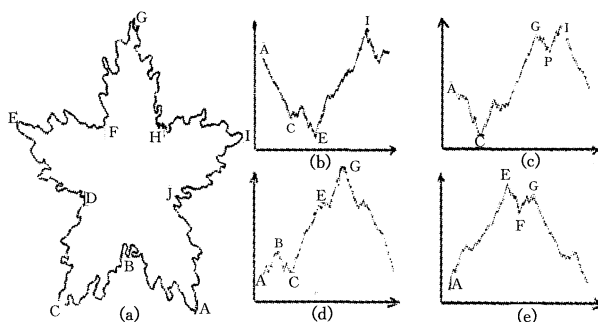


图8 五角星轮廓在不同方向上的高度函数

定义 1(视觉曲率) 对于曲线 C 上的一个点 v,S(v) 代表该点在曲线上宽度为 ΔS 的邻域,该点处的视觉曲率为:

$$K_{N,\Delta S}(v) = \pi \frac{\sum_0^{N-1} \# [H_{\alpha_i}(S(v))]}{N\Delta S} \tag{5}$$

其中,#[Hαi(S(v))]代表高度函数 Ha 上,在点 v 的邻域 S(v)中的极值点的个数,无论该极值点是极大值还是极小值[6]。

该定义指明了如何计算视觉曲率。对于曲线上的点 v,在每个高度函数 Ha 中先计算其邻域中有多少个点是该高度函数的极值点,再将所有高度函数中在该邻域的极值点的个数相加,通过式(5)就可以计算出该点的视觉曲率值。

2.4 曲面的视觉主曲率

曲面的主曲率是三维物体最重要的一个内蕴形状量,在三维模型的渐进式表示、曲面分析、基于视觉特性的形状分析等算法中起着关键作用。经典的主曲率定义适用于正则曲面,对常用的三维模型没有定义。很多学者提出了在不同尺度上计算主曲率的方法。一类是将曲面与一个具有局部平滑效果的核函数进行卷积,通过改变该核函数的参数来获得多尺度的主曲率。这类方法需要不断改变原曲面,尺度参数的几何意义不明显,不方便设置尺度参数。另一类是通过模型简化,在简化的模型上估算主曲率。这些方法本质上是一种局部估算,对噪声敏感,在大尺度时很难消除小的形状细节。由于曲面上一点的主曲率和曲面在该点的法线紧密相关,在微分几何中往往先定义法线,再定义主曲率。然而曲面的法线也是一个局部量,很容易受噪声影响。为克服这一矛盾,本文采用同时估算法线方向和主曲率的最小最大化法则方案[6]。

如图 9 所示, v 是曲面 S 上的一点, $L(v)$ 是以 v 点为起始点的一个单位矢量, $P_1(v)$ 和 $P_2(v)$ 是包含 $L(v)$ 且相互正交的两个平面, $L(v)$ 是 $P_1(v)$ 和 $P_2(v)$ 这两个平面的交线的方向矢量。围绕 $L(v)$ 同时旋转 $P_1(v)$ 和 $P_2(v)$, 可以得到一系列的正交平面组 $(P_1(v), P_2(v))_\alpha$ 。这些平面和曲面 S 的交线是平面曲线。通过这些平面曲线可以计算其多尺度的视觉曲率。

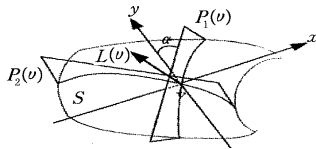


图 9 通过点与曲面相并的正交平面组

在尺度为 0 时, 以 $L(v)$ 为公共直线的平面组 $(P_1(v), P_2(v))_\alpha$ 和曲面 S 的交线在点 v 处都有一个曲率值, 其中最大的为 $K_{L(v)}$ 。根据微分几何知识, 当 $L(v)$ 是曲面 S 在点 v 的法线时, $K_{L(v)}$ 最小。因此, 可通过搜索 $L(v)$ 空间使 $K_{L(v)}$ 达到全局最小值, 同时获得法线方向和主曲率值。

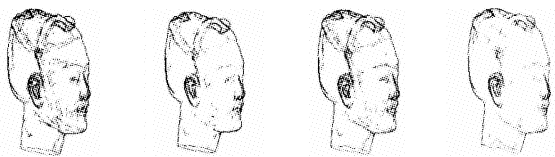
定义 2(最小最大化法则) 假设 $C(v)$ 是平面 $P_1(v)$ 和曲面 S 的交线, 并且 $K_{C(v)}$ 是 $C(v)$ 在该点的视觉曲率, 则曲面的视觉主曲率定义如下: 对曲面 S 上的任意一点 v , $K_{L(v)}^\lambda$ 是包含 $L(v)$ 的平面和曲面 S 的相交曲线在点 v 处的尺度为 λ 时视觉曲率的最大值。当 $K_{L(v)}^\lambda$ 到达全局最小值时, 对应的 $L(v)$ 为曲面 S 在点 v 处的视觉法线, 表示为 $N^\lambda(v)$ 。 $K_{N^\lambda(v)}^\lambda$ 为视觉主曲率, 表示为:

$$k_{L(v)}^\lambda = \min_{L(v)} \max_{C(v)} K_{C(v)}^\lambda \quad (6)$$

式(6)被称为最小最大化法则, 该法则是计算曲面视觉法线和视觉主曲率的方法。

3 问题分析

文物点云模型由于设备精度、自遮挡以及扫描环境等因素的影响, 大多粗糙且富含噪声。利用 Taubin 平滑算法对兵马俑头部三维模型进行降噪处理的效果并不理想, 如图 10 所示。



(a)平滑前 $\lambda=0.97$ (b)平滑前 $\lambda=0.93$ (c)轻度平滑 (d)过度平滑

图 10 利用 Taubin 算法处理兵马俑模型的平滑效果对比

图 10(a)为文物模型进行平滑处理之前提取的特征线, 图 10(c)和图 10(d)分别为利用 Taubin 平滑算法对文物模型平滑后提取的特征线。实验过程中, 项目组发现通过改变 λ 的取值, 可以减少杂乱的特征线条, 而且边界线不会变形, 但纹理细节不能被绘制出来, 如眼睛部位, 如图 10(a)和图 10(b)所示。由图 10(a)、图 10(c)和图 10(d)的对比可以看出, 当文物模型不进行平滑处理时, 由于噪声影响提取到很多杂乱的特征线, 但轻度的平滑处理不足以去除噪声对特征线提取的影响, 过度的平滑处理又会导致丢失纹理细节, 如眼睛部位。那么, 应该如何解决过度平滑导致的文物三维模型纹理细节丢失的问题?

定义 3(特征区域) 是文物三维模型上曲率变化明显且曲率绝对值较大的区域。

定义 4(平坦区域) 是文物三维模型上曲率变化不明显且曲率绝对值趋近于零的部分。

定义 5(λ 领域均值) 是基于考古先验知识和实验统计分析所确定的特定类别文物模型的局部平滑处理的参考阈值。

实验表明, 曲面上凹凸明显的地方往往具有较大的曲率, 而这些凹凸明显的区域, 也是线图最重要的细节绘制部分。Meyer 的 Voronoi 方法求得的高斯曲率和平均曲率误差小, 检测到的三角网格模型的特征区域更准确, 提取的特征线效果更好, 能够较好地区分曲面法向量发生快速变化的区域(即特征区域)和平坦区域。

文物线图绘制过程中, 考古人员更关注反映文物表面几何变化的曲线。尽管脊线和谷线出现在文物三维模型曲率的极值点处, 能捕获文物的重要结构属性, 但由于脊线和谷线蕴含在对象表面当中, 不会随视点改变而滑动, 用其绘制的线图会显得很尖锐, 不能形成自然可视的文物线图。视觉曲率、经典曲率都是对曲线在某一点弯曲程度的一种度量。视觉曲率利用了函数空间 H_α 的 N 抽样集合 $\{H_\alpha, i=0, 1, \dots, N-1\}$, 这说明视觉曲率依赖于抽样率。抽样的过程是一个信息减少, 最多保持不变的过程。很显然, 抽样率越高, 计算的视觉曲率越精确。理论上, 当高度函数的个数趋于无穷时, 将获得最精确的视觉曲率值。但是, 在视觉曲率的定义中, 所有的极值点无论重要与否都会被统计, 并产生相同的贡献。这是曲率容易受噪声影响的重要原因。实践中, 通过为极值点定义一个尺度, 可获得多尺度的视觉曲率, 从而在一定程度上抑制噪声的影响。

图 8 表明, 一个点的曲率值越大, 该点在越多方向的高度函数中是极值点。更重要的是, 从高度函数中可以发现, 不同的极值点的重要程度不一样。噪声可以在曲线上产生很多极值点, 但这些极值点在各自的高度函数中通常对应着很小的“峰”或者“谷”, 而很大的凸区域或者凹区域的端点在很多高度函数中都对应着很大的“峰”或者“谷”。这说明可以通过度量高度函数中极值点对应的“峰”或者“谷”的大小, 来度量形状的细节程度, 这就提供了一种区分不同尺度的形状细节的新方法。

定义 6(多尺度视觉曲率) 对于曲线 C 上的任意点 v , $S(v)$ 是宽度为 ΔS 的邻域, 则点 v 处的多尺度视觉曲率为:

$$K_{N, \Delta S}^\lambda(v) = \pi \frac{\sum_0^{N-1} \# [H_{\alpha_i}(S(v))]}{N \Delta S} \quad (7)$$

其中, λ 是尺度因子, $\# [H_{\alpha_i}(S(v))]$ 代表高度函数 H_α 中属于邻域 $\Delta S(v)$ 的所有尺度值不小于 λ 的极值点的个数。在多尺度视觉曲率中, 仅仅需要统计相对重要的极值点, 而忽略掉尺度值小于 λ 的极值点。

三维平面的主曲率是一个局部微分量, 容易受噪声影响。原因在于其计算通常依赖于曲面法线, 而曲面法线易受噪声影响, 很难被准确估算, 因而计算出的主曲率误差很大。本文引入最小最大化法则来解决这一问题。

最小最大化法则本质上是搜索所有可能的曲面法线方向来获得最佳的法线方向, 在每个可能的法线方向上, 计算通过该法线的平面和曲面的交线的多尺度视觉曲率。由于需

要搜索所有可能的法线方向,并且在每个可能的法线方向上计算所有通过该法线的平面和曲面的交线的多尺度视觉曲率值,该算法的复杂度相当高。假设有 t 个可能的法线方向对于每个可能的法线方向有 m 个通过该方向的平面,这些平面和曲面的交线上的点的个数平均为 n ,每条交线平均的高度函数个数为 k ,则最小最大化法则的复杂度为 $O(tmkn^2)$ 。

为了减少搜索的法线方向的个数,可先大致估算一个法线方向,再围绕该法线方向抽样,目的是在保证法线精度的前提下使 t 尽可能小,以最小的代价获得最高的精度。对于每一个可能的法线方向,有无穷多个通过该法线的平面,一般通过均匀抽样来获得 m 个通过该法线的平面。对于每一个交线,参照平面曲线的视觉曲率计算公式,通过对角度区间 $[0, \pi]$ 均匀抽样,来获得 N 个高度函数。在每个高度函数上,计算每个顶点的尺度值,通过忽略小的极值点估算出视觉曲率值。最后,利用最小最大化法则选择最佳的曲面法线方向并获得曲面视觉主曲率值。

4 算法设计

4.1 基本流程

基于以上分析,本文提出针对不同类型的文物三维模型的算法,首先,基于函数空间 H_c 的 N 抽样集合 $\{H_c, i=0, 1, \dots, N-1\}$,通过统计每个顶点在多少个高度函数中是极值点,计算出三维模型顶点的视觉曲率值;然后,基于 λ 尺度约束下的顶点视觉曲率分布,将模型划分为平坦区域和特征区域;接着,基于考古领域均值对属于特征区域的顶点进行锐化滤波,计算出新的三角网格模型顶点坐标;最后,提取文物模型的特征轮廓线,并绘制出符合考古人员视觉感知且能有效保留纹理细节的文物线图。

4.2 视觉曲率的估算

计算视觉曲率时,离散化是关键的第一步。综合分析离散曲率估算方法的性能^[7],本文采用 Meyer 等的 Voronoi 方法来估算三角网格模型的离散曲率,具体步骤如下:

(1)存储每个顶点的邻接点以及邻接面,并记录每个顶点的邻接点总数 n ,邻接面总数 m 。

(2)计算每个三角面的法矢量 n_j 及面积 s_j 。如图 11(a)所示,设顶点 p_i 有 m 个相邻三角形,则相应的顶点 p_i 有 m 个邻接顶点 $v_j (1 \leq j \leq m)$, n_j 为三角形 $p_i v_j v_{j+1}$ 的法矢量, N_i 为顶点 p_i 的法矢量,计算公式如下:

$$n_j = \frac{(v_j - p_i) \times (v_{j+1} - p_i)}{\| (v_j - p_i) \times (v_{j+1} - p_i) \|} \quad (8)$$

三角形面积 s_j 的计算公式如下:

$$s_j = \frac{(v_j - p_i) \times (v_{j+1} - p_i)}{2} \quad (9)$$

其中, $1 \leq j \leq m$ 。

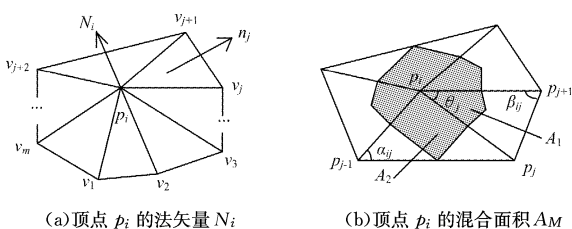


图 11 顶点的法矢量和混合面积

(3)计算每个顶点的法矢量。顶点的法矢量用顶点的邻接三角形面积作为权因子来估算,计算公式如下:

$$N_i = (1 / \sum_{j=1}^m s_j) \sum_{j=1}^m n_j s_j \quad (10)$$

(4)计算每个顶点的相邻三角形的投影面积总和 A_M 。1)如果为锐角三角形,取三角形的外心与顶点 p_i 相连的两条边的中点并连接,得到图 11(b)所示的面积 A_1 。2)如果为直角三角形或钝角三角形,取三角形直角或钝角所对边的中点与顶点 p_i 相连的两条边的中点并连接,得到图 11(b)所示的面积 A_2 。 A_M 为用以上两种方法求得的整个混合面积,如图 11(b)的阴影区域。

(5)遍历三角网格模型的所有顶点,计算顶点 p_i 的高斯曲率 $k_G(p_i)$ 、平均曲率 $k_H(p_i)$ 、最大主曲率 $k_1(p_i)$ 和最小主曲率 $k_2(p_i)$ ^[8]。顶点 p_i 的高斯曲率、平均曲率分别依据式(11)和式(12)计算:

$$k_G(p_i) = \frac{1}{A_M} (2\pi - \sum_{j \in N(i)} \theta_j) \quad (11)$$

$$k_H(p_i) = \frac{1}{4A_M} \sum_{j \in N(i)} (\cot \alpha_{ij} + \cot \beta_{ij}) (p_j - p_i) \cdot N_i \quad (12)$$

其中, A_M 是三角形的混合面积, θ_j 表示边 $p_i p_j$ 和 $p_i p_{j+1}$ 的夹角, α_{ij} 表示边 $p_i p_{j-1}$ 和 $p_{j-1} p_j$ 的夹角, β_{ij} 表示边 $p_i p_{j+1}$ 和 $p_j p_{j+1}$ 的夹角, N_i 为顶点 p_i 的法矢量。

顶点 p_i 的最大主曲率和最小主曲率可由顶点 p_i 的高斯曲率和平均曲率求得,计算公式如下:

$$k_1(p_i) = k_H(p_i) + \sqrt{k_H^2(p_i) - k_G(p_i)} \quad (13)$$

$$k_2(p_i) = k_H(p_i) - \sqrt{k_H^2(p_i) - k_G(p_i)} \quad (14)$$

由于三角网格模型的离散曲率所蕴含的性质与视点无关,因此对一个具体模型来说,每个顶点的曲率只需在预处理阶段计算一次即可,避免了因视点改变引起的大量计算。在离散曲率计算的基础上,采用均匀采样法,基于式(5)和式(6)计算出模型顶点的视觉主曲率值。

4.3 特征区域的检测

检测三维模型的特征区域的目的在于突出细节特征的锐化操作,同时避免平坦区域的噪声由于全局锐化作用而被放大,影响线图特征线提取的效果。平坦区域上噪声点的法矢或曲率通常是不连续的,即是孤立的。因此,判断一点是否属于模型的平坦区域,除了判断该顶点的曲率绝对值是否趋近于 0 之外,还要判断该顶点邻域内的顶点曲率绝对值。如果该顶点的邻接点中有两个以上的曲率绝对值不趋于 0,则该顶点被认为是平坦区域的孤立噪声,应将其划分为平坦区域。

4.4 局部锐化处理

局部锐化处理是为了放大文物三维模型的特征细节。将局部锐化作用于属于模型特征区域的顶点,能够有效避免全局锐化对模型噪声的放大,步骤如下:

- (1)遍历模型所有顶点,判断顶点所在区域;
- (2)如果顶点属于平坦区域,则转向步骤(1);
- (3)如果顶点属于特征区域,则转向步骤(4);
- (4)对三维模型属于特征区域的顶点进行锐化处理,重新计算该区域内顶点的新坐标。

1)对于三角网格模型中需要进行锐化处理的顶点 p_i 和它的邻接点 p_j ,计算顶点 p_i 的位置偏移量 Δp_i ,计算公式为:

$$\Delta p_i = \sum_{j \in i} w_{ij} (p_j - p_i) \quad (15)$$

其中, w_{ij} 为权重函数, 满足 $\sum_{j \in i} w_{ij} = 1$ 。为了计算方便, w_{ij} 取值为 $1/n$, 即为顶点 p_i 的邻接点个数的倒数。

2) 计算顶点 p_i 的新坐标 p_i' , 计算公式为:

$$p_i' = p_i + (\mu - \lambda) v(\Delta p_i) - \mu \lambda \Delta p_i \quad (16)$$

其中, μ 和 λ 为缩放参数, 满足 $0 < \lambda < \mu < 1$ 。 $v(\Delta p_i)$ 代表一个向量, 表示顶点 p_i 的 3 个分量的绝对值的平方根。若计算结果为 $\Delta p_i = (x, y, z)$, 则 $v(\Delta p_i) = (\sqrt{|x|}, \sqrt{|y|}, \sqrt{|z|})$ 。

平滑处理会导致三维模型向中心缩小, 相反锐化处理会导致三维模型向外扩张。式(15)将 Taubin 平滑公式右边最后一项的正号改为负号, 起到了与平滑处理相反的效果, 从而凸显模型的局部特征。为避免这种扩张对特征线的提取造成影响, 在式(16)中加入 $(\mu - \lambda) v(\Delta p_i)$, 它与第 3 项 $\mu \lambda \Delta p_i$ 符号相反, 能够有效减弱三维模型向外扩张的程度, 并保证三维模型的局部特征能够被放大^[9]。

执行一遍步骤 1—步骤 4, 称为执行了一次锐化处理。应根据模型类别的不同确定锐化的次数, 直至提取的特征线足以描述文物的细节特征。

4.5 特征线的提取

轮廓线提取是文物线图绘制的核心, 主要包括两部分: 外轮廓线和内部细节。内部细节包括文物表面的彩绘纹饰, 以及明显的棱线等。其中, 折缝线和边界线表示的主要是文物的内部细节, 可直接按照相关概念进行提取。遮挡轮廓线表示的是文物的外轮廓线, 其提取方法^[10]如下所述。

首先, 将网格模型的三角形分为 3 类: 可见三角形、不可见三角形和轮廓三角形。

设顶点 p_i 的视线向量 $w_i = p_i - c$, 其中 c 为视点坐标。如果顶点 p_i 的法向量与该顶点的视线向量 w_i 的点积大于 0, 则称该顶点可见; 如果小于 0, 则称该顶点不可见。3 个顶点都为可见点的三角形为可见三角形; 3 个顶点都为不可见点的三角形为不可见三角形; 轮廓三角形则为三个顶点不全为可见点或不全为不可见点的三角形, 如图 12 所示。

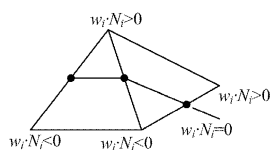


图 12 线性插值提取遮挡轮廓线

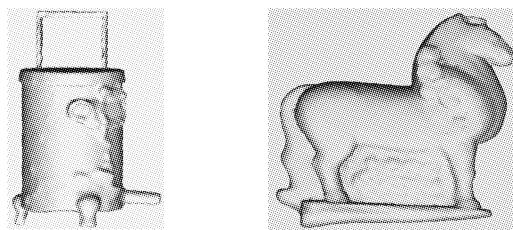
图 12 所示的轮廓三角形上必有遮挡轮廓线经过, 通过遍历三角网格模型找到轮廓三角形, 对其可见性不一致的两个顶点进行线性插值:

$$p = \frac{|t_j|}{|t_i| + |t_j|} p_i + \frac{|t_i|}{|t_i| + |t_j|} p_j \quad (17)$$

其中, $t_i = \frac{w_i \cdot N_i}{\|w_i\| \|N_i\|}$, 找到 $w_i \cdot N_i = 0$ 的点后将它们连接并在屏幕上绘制出来, 就是三维模型的遮挡轮廓线。

5 实验验证

为证明本文方法对表面粗糙、富含噪声的文物三维模型线图绘制的有效性, 项目组进行了多组验证实验。实验数据为文化遗产数字化国家地方联合工程研究中心与陕西考古研究院等机构合作, 通过三维激光扫描技术采集到的西汉张汤墓陪葬品漏钟和唐玄陵前的石马的高精度三维模型, 预处理后的模型如图 13 所示。



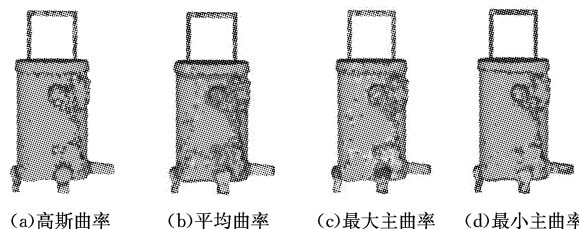
(a) 张汤墓漏钟

(b) 唐玄陵石马

图 13 实验模型正投影视图

Step1 对文物三角网格模型顶点的视觉曲率进行估算, 进而绘制出其曲率分布图。

图 14 和图 15 分别给出图 13(a) 和图 13(b) 中的三角网格模型进行离散曲率估算后的曲率分布图, 其中浅灰色为曲率值接近于 0 的区间分配。将大于 0 的采样曲率分为两组, 按曲率的大小分配由灰到浅灰的 2 种颜色; 将小于 0 的采样曲率也分为两组, 分配由浅灰到深灰的 2 种颜色。



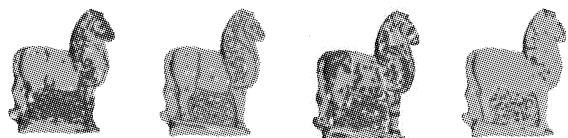
(a) 高斯曲率

(b) 平均曲率

(c) 最大主曲率

(d) 最小主曲率

图 14 漏钟的曲率分布图



(a) 高斯曲率

(b) 平均曲率

(c) 最大主曲率

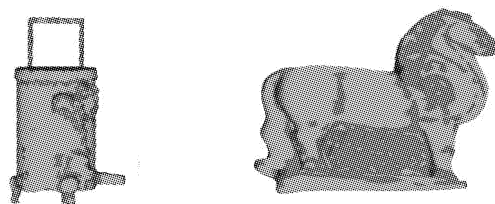
(d) 最小主曲率

图 15 石马的曲率分布图

实践中, 应针对不同类别和规格的文物, 设计既能有效提取文物模型表面特征, 又不会因采用密度过大导致计算困难的均匀采样值。一般而言, 小尺寸文物的采用密度应尽可能大些, 以保留线图绘制所需要的足够细节特征。本文实验中对漏钟的采用率为 128, 对石马的采用率为 64。

Step2 根据三角网格模型顶点 λ 尺度约束下的视觉曲率值, 检测能充分体现模型细节的特征区域。

对于文物三角网格模型, 根据模型顶点的视觉曲率值划分特征区域和平坦区域, 深色部分为模型的特征区域, 浅色为模型的平坦区域, 如图 16 所示。对比对应的模型曲率分布图可知, 本文算法能有效去除平坦区域的噪声点。



(a) 张汤墓漏钟

(b) 唐玄陵石马

图 16 文物模型的区域划分示意图

Step3 基于考古领域均值进行锐化处理, 提取三角网格模型的特征轮廓线, 生成保留足够细节特征的文物线图。

由实验结果可知, 图 17(a) 和图 18(a) 是三角网格模型没有进行锐化操作直接提取得到的线图, 主要特征提取不完整,

不足以表达物体的细节特征。图 17(b)和图 18(b)是对三角网格模型全局锐化之后提取得到的平面线图,虽然绘制出了更丰富的线条,但是由于局部噪声的干扰,平坦区域上也绘制有线条,整个线图显得杂乱。图 17(c)和图 18(c)是采用本文方法,经过基于视觉曲率估算的特征区域检测,再进行局部锐化之后提取的线图,不但绘制出了丰富的细节,而且有效抑制了平坦区域的噪声干扰。

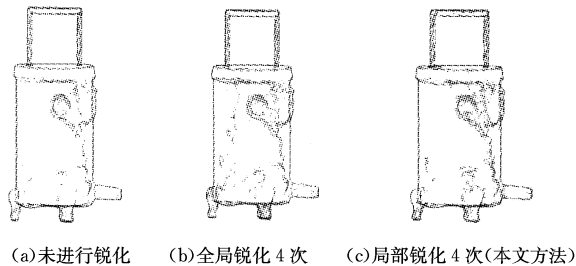


图 17 漏钟的平面线图

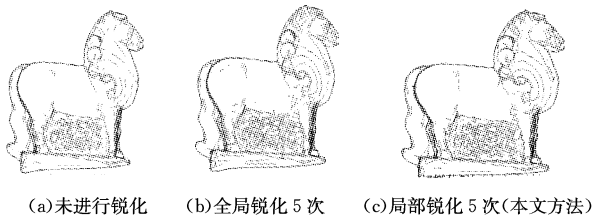


图 18 石马的特征线提取结果

结束语 针对表面粗糙、富含噪声的文物三维模型,如何精确选择需要锐化处理的特征区域,如何提取到符合人类视觉特征的文物线图,是解决考古线图自动绘制的难点。传统的主曲率估算依赖于法线的估算,而法线容易受噪声的影响。最小最大化法则同时估算曲面法线和主曲率,能获得高鲁棒的法线和主曲率,获取的多尺度视觉主曲率能在连续尺度空间上展现物体不同尺度的形状细节,从而更符合文物线图绘制的特定视觉处理要求。

本文提出了应针对不同材质的文物三维模型,在考古领域均值的基础上进行局部锐化预处理,基于视觉依赖曲率的估算提取文物模型的视觉轮廓线,进而绘制出符合考古专家

视觉感知的文物线图的可行解决方法。实践表明,本文方法能够在保留更多模型细节的同时使绘制的噪声线条更少,有效避免了因视点改变引起的大量计算,绘制出的线图更符合考古工作的实际需要,有效解决了手工考古绘图速度慢、精度低和工作强度大的问题。下一步的工作是引入机器学习方法,解决多尺度视觉曲率计算式(6)中 λ 值的自动设置和模型区域的精确自动划分问题,为大规模考古线图的自动化准确绘制提供技术支撑。

参考文献

- [1] 马鸿藻. 田野考古绘图[M]. 北京:北京大学出版社,2010.
- [2] ZHOU M Q,GENG G H,WU Z K. Digital Preservation Technology for Cultural Heritage[M]. Springer,2012.
- [3] COLE F,SANIK K,DECARLO D,et al. How well do line drawings depict shape? [J]. ACM Transactions on Graphics,2009,28(3):341-352.
- [4] DECARLO L T. An application of signal detection theory[J]. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition,2003,29:767-778.
- [5] JUDD T,DURAND F,ADELSON E. Apparent ridges for line drawing[J]. ACM Siggraph,2007,26(3):19.
- [6] 刘海荣. 形状的曲率表示与分解[D]. 武汉:华中科技大学,2009.
- [7] 方惠兰,王国瑾. 三角网格曲面上离散曲率估算方法的比较和分析[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(11):2500-2507.
- [8] 樊少荣,茹少峰,周明全,等. 破碎刚体三角网格曲面模型的特征轮廓线提取方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(9):2003-2009.
- [9] KOLOMENKIN M,SHIMSHONI I,TAL A. Demarcating curves for shape illustration[J]. ACM Transactions on Graphics,2008,27(5):32-39.
- [10] JING H,ZHOU B F. A 3D model feature- line extraction method using mesh sharpening[C]//Proceeding of Edutainment. Berlin:Springer,2006:840-848.
- [11] 李娜,耿国华,王小凤. 一种采用纹理分布特征的标定方法[J]. 计算机科学,2015,42(12):288-291.
- [12] 李娜,耿国华,王小凤. 一种采用纹理分布特征的标定方法[J]. 计算机科学,2015,42(12):288-291.
- [13] MIYAMOTO A,KONNO M,BRUHWILER E. Automatic crack recognition system for concrete structures using image processing approach [J]. Asian J. Inf. Technol.,2007,6(5):553-561.
- [14] JAHANSHAHI M R,MASRI S F. Adaptive vision-based crack detection using 3D scene reconstruction for condition assessment of structures [J]. Automation in Construction,2012,22:567-576.
- [15] CASTLEEMAN K. Digital Image Processing [M]. Prentice-Hall,1996.
- [16] IYER S,SINHA S K,TITTMANN B R,et al. Ultrasonic signal processing methods for detection of defects in concrete pipes [J]. Autom. Construct.,2012,22:135-148.
- [17] 汤一平,韩国栋,鲁少辉,等. 基于 CNN 的火炮身管全景图像疵病识别方法[J]. 仪器仪表学报,2016,4(37):871-878.
- [18] TANG Y P,WANG Q,ZONG M L,et al. Design of Vertically Aligned Binocular Omnistereo Vision Sensor [J]. Chinese Journal of Sensors & Actuators,2010,7525(1):1-24.
- [19] 徐海涛,周静恺,林璐璐,等. 基于 ASODVS 的全景点云数据获取技术的研究[J]. 计算机测量与控制,2014,22(7):2284-2287.
- [20] 汤一平,姜荣剑,林璐璐. 基于主动式全景视觉的机器人障碍物检测[J]. 计算机科学,2015,42(3):284-288.
- [21] NIXON M S,AGUADO A S. Feature Extraction and Image Processing,Second Edition [M]. Singapore:Elsevier Pte Ltd,2010.
- [22] 赵志宏,杨绍普,马增强. 基于卷积神经网络 LeNet-5 的车牌字符识别研究[J]. 系统仿真学报,2010,22(3):638-641.
- [23] SAINATH T N,MOHAMED A R,Kingsbury B,et al. Deep convolutional neural networks for LVCSR [C]//IEEE International Conference on Acoustics,2013:8614-8618.

(上接第 211 页)

- [13] MIYAMOTO A,KONNO M,BRUHWILER E. Automatic crack recognition system for concrete structures using image processing approach [J]. Asian J. Inf. Technol.,2007,6(5):553-561.
- [14] JAHANSHAHI M R,MASRI S F. Adaptive vision-based crack detection using 3D scene reconstruction for condition assessment of structures [J]. Automation in Construction,2012,22:567-576.
- [15] CASTLEEMAN K. Digital Image Processing [M]. Prentice-Hall,1996.
- [16] IYER S,SINHA S K,TITTMANN B R,et al. Ultrasonic signal processing methods for detection of defects in concrete pipes [J]. Autom. Construct.,2012,22:135-148.
- [17] 汤一平,韩国栋,鲁少辉,等. 基于 CNN 的火炮身管全景图像疵病识别方法[J]. 仪器仪表学报,2016,4(37):871-878.