

基于形态学的散乱点云轮廓特征线提取

程效军, 方 芳

(同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘要: 采用逆向工程领域切片技术和数学形态学方法提取点云的轮廓特征线。空间散乱点云密度高且无拓扑关系, 通过切片分层可将空间点云转换为不同层的平面切片点云。借鉴图像处理方法, 将切片点云转换成二值图像, 使用形态学运算提取其轮廓像素, 将轮廓像素转换为轮廓特征点并采用 B 样条曲线拟合生成轮廓特征线。实验验证该方法可以得到高质量轮廓线, 并可以有效地解决“多环”切片难以正确提取轮廓特征的问题。

关键词: 切片技术; 形态学; 轮廓特征; 散乱点云

中图分类号: P232

文献标志码: A

Morphology-based Scattered Point Cloud Contour Extraction

CHENG Xiaojun, FANG Fang

(College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Slicing technology and morphological operators are employed to extract contour feature from scattered point cloud. Through slicing, unorganized point with high density can be transformed into point sets on a series of plane layers. Raster structure of digital image is utilized to organize sliced point cloud to generate binary images. Then morphological operators are employed to extract contour pixels. The contour pixels are transformed back to contour points, and B spline fitting is done to generate contour feature. The experiment results show that this method can produce high quality result and overcome the multi-loop problem.

Key words: slicing; morphology; contour feature; scattered point cloud

应用, 点云特征可以为建模提供约束^[1], 可以作为点云配准的辅助条件^[2], 在计算机视觉领域还可以作为渲染可视化的依据^[3], 点云的轮廓特征线在逆向工程领域中则是构建模型的基础。

点云轮廓特征线提取方法可以分为三种^[4]: ①从点云重建的表面模型构建三角网格, 再基于三角网格生成轮廓特征线; ②由点云直接生成三角网格模型, 再提取轮廓特征线; ③直接基于点云生成轮廓特征线。前两种方法由于涉及转换三角网格模型而计算复杂耗时^[5], 并且会引起更多的误差传播^[6], 因此, 越来越多的研究致力于直接从点云中提取轮廓特征线^[7]。常用的方法是利用点集邻域局部拟合曲面, 计算点的主曲率, 通过寻找主曲率极值点得到曲面特征点, 从而生成特征线^[8], 逐点计算主曲率的过程复杂并且时间成本高。在快速成型领域, 通常利用切片技术将空间离散点云转换为切片点云, 然后对二维形式的切片点云进行处理^[9]。切片技术的优势是将三维的点云数据转换到二维平面, 对于三维空间难以处理的问题将变得简单。

在平面领域, 数字图像处理技术中有许多特征提取方法可以借鉴, 其中, 形态学主要研究图像的形态几何特征, 能够将大量复杂的图像处理运算转换为简单的移位与逻辑运算的复合来完成^[10]。本文通过切片技术利用弦高差阈值法进行海量散乱点云的快速压缩, 然后借鉴图像栅格形式组织空间散乱点云, 转换为平面二值图像, 采用形态学操作提取点云轮廓特征, 并且本文方法可以有效提取“多环”点云特征。

1 点云压缩

1.1 切片点云生成

首先, 对散乱点云进行分层, 分层方向为用户自

地面三维激光扫描可以快速获取高密度的物体表面点坐标, 因此其数据被形象地称为点云。特征提取作为点云数据处理的基础研究环节有非常重要的

收稿日期: 2013-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(40971241)

第一作者: 程效军(1964—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为摄影测量, 地面三维激光扫描技术以及三维建模。

E-mail: cxj@tongji.edu.cn

定义,最常用的是沿 x 轴、 y 轴或 z 轴,对不同对象应根据其形状和结构特征决定分层方向. 设有散乱点集 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $p_i = \{x_i, y_i, z_i\} \in \mathbf{R}^3$, 点集坐标范围是 $(x_{\min}, y_{\min}, z_{\min}) \sim (x_{\max}, y_{\max}, z_{\max})$. 若沿 z 轴进行分层, 分层数为 n , 则每层厚度可计算得到:

$$z_{\text{thi}} = (z_{\max} - z_{\min}) / n \quad (1)$$

式中: z_{thi} 为分层厚度; z_{\max} , z_{\min} 分别为点集 z 坐标的最大值和最小值. 点云切片生成主要有两类算法: 投影平面法和虚拟边缘法^[11]. 投影法简便易行效率高, 但是容易形成较多冗余点, 虚拟边缘法生成的轮廓点云质量更好, 但是计算相对复杂. 投影法冗余点较多的缺陷在后续特征点判断环节可以得到解决, 因此本文采用该方法生成切片点云. 对分层的点云定义每层的中间位置为该层的投影参考面如式(2)所示, 并将该层内所有的点投影至该平面.

$$Z_i = z_{\min} + \frac{2i-1}{2} \cdot z_{\text{thi}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中, $Z_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是一组平行于 xoy 平面、法矢指向 z 轴正向的平面集, Z_i 表示第 i 层的参考投影面. 分层厚度的选择和最终对模型精细程度的要求相关, 当需要高质量的模型时, 须设置更小的分层厚度得到更多的分层数, 反之亦然. 这也和物体表面的曲面变化程度有关, 通过观察物体表面的复杂程度, 评估一定厚度内的轮廓形状是否有足够的相似度, 可为分层数的选择提供依据. 最佳的分层厚度应该是生成的切片点云能清晰地表达轮廓形状而同时又不会产生过多的层数, 自适应分层^[12]的研究正是为了解决这个问题. 三维到二维的降维处理避免了在庞大的数据上进行复杂的计算, 并且将从空间和时间两方面简化后续的运算, 使轮廓特征线提取变得简便和灵活.

1.2 基于弦高差法的点云压缩

原始点云数据量大, 每层切片点云在表示物体轮廓时呈现冗余密集的状态, 不利于轮廓特征线的提取, 因此必须精简点云. 本文采用弦高差法^[13]逐层对切片点云进行压缩, 弦高差法计算点到其相邻两点连线的垂直距离, 并与给定的阈值比较大小决定点是被删除或保留, 如图 1 所示, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 表示切片上的点集, d_i 表示点 p_i 到其前后两点连线的垂直距离. 当 $d_i \geq \text{阈值}$ 时, 保留该点; 若 $d_i < \epsilon$, 则认为该点处变化平缓, 删除该点.

自定义的阈值参数 ϵ 可由不同指标来定义, 本文依据点云数据分层后每层的弦高差均值来选取阈值, 每层的弦高差均值是该层所有点弦高差的平均值.

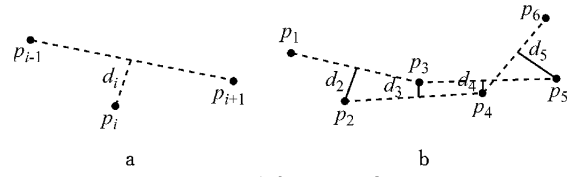


图 1 弦高差法示意

Fig. 1 Chordal deviation method

2 基于形态学的轮廓特征线提取

2.1 点云二值图像生成

要借鉴图像处理领域的各种方法, 首先要对平面点云进行组织, 使其形成类似图像的栅格阵列的数据形式^[5]. 对于某层切片点云 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, n 为该层点数. x_i 和 y_i 是点 p_i 的坐标. x_{\min} , x_{\max} , y_{\min} 和 y_{\max} 表示点集中 x 、 y 方向的最小和最大值. H 和 W 表示最小包围矩形的长和宽, 分别通过 y_{\max} 和 y_{\min} 以及 x_{\max} 和 x_{\min} 的差值确定. 对该矩形进行划分, 使之成为 a 行 b 列的格网阵列, 对每个单元格按顺序进行标记. 位于第 i 行、第 j 列的单元格, 其标记号 $I_{d,i,j}$ 由式(3)得到. 形成这些格网结构后, 所有的点都将归入某个单元格内. 对于点 $p_i(x_i, y_i)$ 可以通过式(4)计算其所在的单元格序号 $I_{d(p_i)}$, 其中 S_{gri} 表示单元格尺寸, R_{ow} 表示点 p_i 所在列数, C_{ol} 表示其所在行数:

$$I_{d,i,j} = (i-1)W + j \quad (3)$$

$$R_{\text{ow}} = \text{int}[(x_i - x_{\min}) / S_{\text{gri}}] \quad (4)$$

$$C_{\text{ol}} = \text{int}[(y_i - y_{\min}) / S_{\text{gri}}] \quad (5)$$

$$I_d(p_i) = (R_{\text{ow}} - 1)W + C_{\text{ol}} \quad (6)$$

式(4)~(6)中, $\text{int}[\]$ 表示取整函数. 单元格将记录所有落入该单元格的点号. 有点落入的单元格标记为 1, 否则标记为 0. 每个单元格如同一个像素, 0 和 1 表示该像素的值, 由此形成切片点云的二值图像格式, 如图 2 所示.

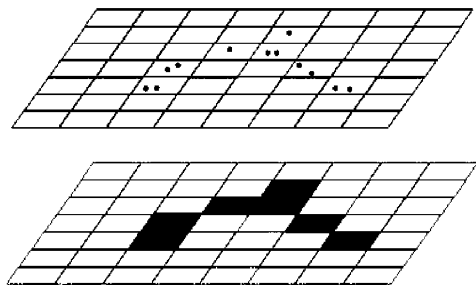


图 2 切片点云二值图像生成过程

Fig. 2 Binary image generation of sliced point cloud

在生成平面栅格数据时, 单元格尺寸的选择非

常重要.若尺寸过大,一个单元中会落入更多的点,在后期使用图像处理技术时,只对该单元表示的像素进行处理,而非对点进行处理,这类似于对单元内的点进行了平滑,特征在这个过程中损失掉.若尺寸过小,像素增多,增加后期使用图像处理手段分析的时间成本. Piegl 详细论证了网格尺寸大小的选取方法,并总结出如式(7)的经验公式^[14]:

$$S_{\text{gri}} = \alpha \sqrt{W \times H / n} \quad (7)$$

式中, S_{gri} 是格网的大小, α 是单元格尺寸调节因子,其经验值为 1.0 到 1.5.

2.2 点云轮廓特征线提取

二值点云图像由联通的一组像素表示轮廓,这些轮廓呈现断裂或者毛刺以及不均匀的现象,有较多像素覆盖的区域表现的轮廓较粗,反之,另一些区域则较细.采用形态学运算处理图像,可以快速修补这些不完善的区域并取得较满意的结果.数学形态学利用集合来表示不同的对象^[9],在二值图像中,所有黑色(或白色)的像素集合是图像完整的形态描述.形态学运算由一组形态学代数运算符组成,其中膨胀和腐蚀操作是形态学处理的基础,基于这两种基本的运算可以构造出许多其他形态学操作.膨胀和腐蚀操作使图像整体形态发生变化,膨胀使图像扩大,腐蚀使图像缩小,但是在很多时候,进行形态学操作后希望能够保持图像中对象的原始形态,形态学中的开操作和闭操作可以满足这个要求.开操作一般使对象轮廓变得光滑,断开狭窄的间隙和细的突出物,闭操作同样使轮廓线更光滑,但是,它消除小的孔洞,并填补轮廓线中的断裂.

二值点云图像的边界轮廓厚度较大,局部有毛刺和断裂的情况,因此,所选择的图像处理操作应该具备修复断裂区域以及去除毛刺的功能,同处理后,图像本身的形态不应有变化.根据以上要求,首先对点云二值图像进行闭操作运算,对轮廓像素进行修补和修剪,然后使用细化运算得到单像素表示的联通边界.

2.3 轮廓特征线拟合

对二值图像进行细化操作后,联通的黑色像素即表示切片点云的轮廓.每个像素对应的单元格记录着落入该区域的点数和点号,用式(8)计算该栅格内所有点的三维坐标平均值,作为其对应的空间特征点,其中 $I_d = 1, 2, \dots, m$.

$$x_{id} = \sum_{i=1} x_i / n_{id} \quad (8a)$$

$$y_{id} = \sum_{i=1} y_i / n_{id}, \quad (8b)$$

$$z_{id} = \sum_{i=1} z_i / n_{id} \quad (8c)$$

式中: I_d 表示栅格标号; n_{id} 表示落入该栅格的点数.基于点集拟合曲线的方式有很多种,最常见的方式是分段多项式插值和 B 样条曲线拟合方法,本文使用均匀三次 B 样条曲线来拟合轮廓特征线.

3 实验分析

本文实验采用 FaroFocus3D 扫描仪采集的华佗像点云,共有 619 060 个点,以及含有 26 103 个点的茶壶点云.

华佗像在 z 方向的高度远大于其他两个方向,因此本文选择按 z 轴切片分层.图 3 为切片点云压缩效果,图 3a 是原始数据,图 3b 是阈值为 0.2 mm 压缩率为 56.5% 的结果,华佗像的五官、胡须、后脑勺发髻等特征仍然清晰地呈现出来.图 3c 是阈值为 0.4 mm,压缩率为 77.3% 的效果,此时雕像的鼻子已经变形,并且发髻处数据丢失严重,五官非常模糊.图 3d 和图 3e 分别是压缩前后(压缩率 56.5%)点云三角构网结果,通过比较压缩前后雕像轮廓和曲率变化剧烈的部位,可以看出压缩率高达 56.5% 时的点云数据构建的模型基本无细节损失,因此可以使用该压缩数据进行轮廓特征线提取.

华佗像高度为 3 m,分层厚度设置为 6 mm,分层数为 500,在这 6 mm 内华佗像横截面轮廓形状的变化小,一层切片点云足以表达这 6 mm 区间的特征.图 4a 是分层数为 500 时第 150 层的切片点云.该层切片点云来自衣襟和袖口底部,图中显示两组分离的点集,袖口底部点云在此层的投影仅为点簇,没有显示出袖口形状,在后续处理中将被滤除.图 4b 是使用栅格结构组织该层切片点云的示意图.

图 5 是使用 4 种不同尺寸栅格组织点云的效果图. α 取值为 1.0、2.0、4.0 和 6.0 时对应的栅格数目分别为 10 160、5 040、2 560 和 1 716.由图 5d 可以看出,栅格尺寸过大时呈现的轮廓粗糙,与图 5a、5b 和 5c 相比,许多细节处产生平滑过度的效果,文本采用 $\alpha = 1.0$ 来定义栅格大小.

图 6a 是二值图像表示的切片点云,图 6b 是对之进行闭运算的效果,可以看到原本断裂的位置实现连通,毛刺也被消除,整个轮廓呈现等厚度的光滑性.图 6c 是使用形态学算子对二值图像细化后再提取边界的结果,原本有一定厚度的轮廓特征此时成为单像素表示的轮廓.像素转换提取的轮廓特征点如图 6d 所示,与图 4a 对比可看出,原本密集带噪声

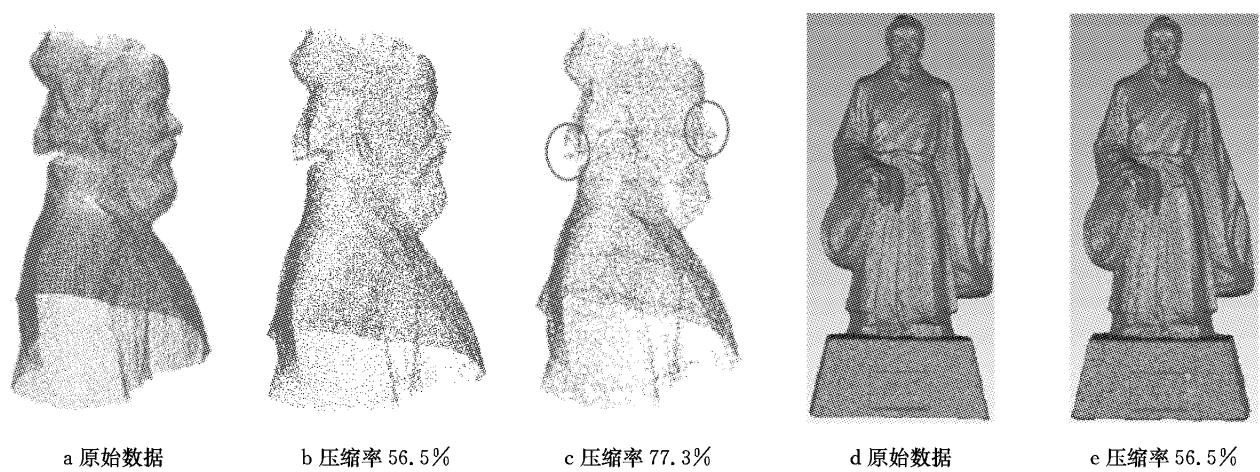


图 3 华佗像点云压缩
Fig.3 Huatuo sculpture point cloud reduction

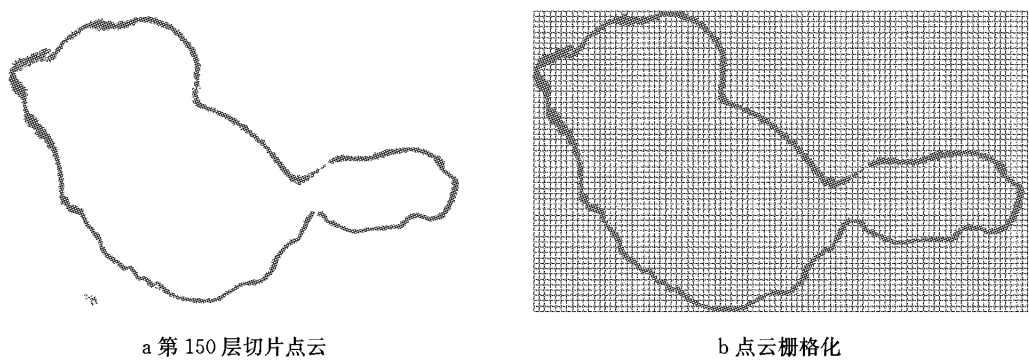


图 4 华佗像切片点云
Fig.4 Huatuo sculpture sliced point cloud

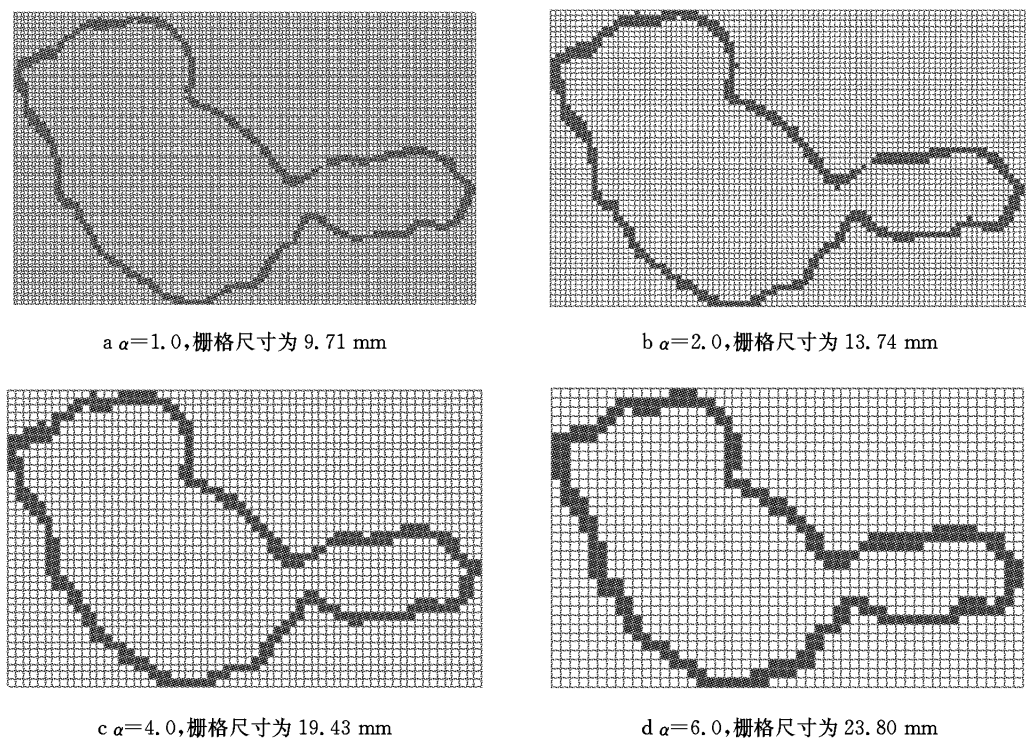


图 5 不同尺寸栅格的二值化图像效果
Fig.5 Binary images of different raster grid sizes

的点集经过上述处理后成为精炼有序地表达物体轮廓特征的点集. 利用均匀 B 样条曲线拟合点集的效

果如图 6e 和 6f 所示, 可以看出最后得到轮廓特征线光滑并且反映出物体此处的形状.

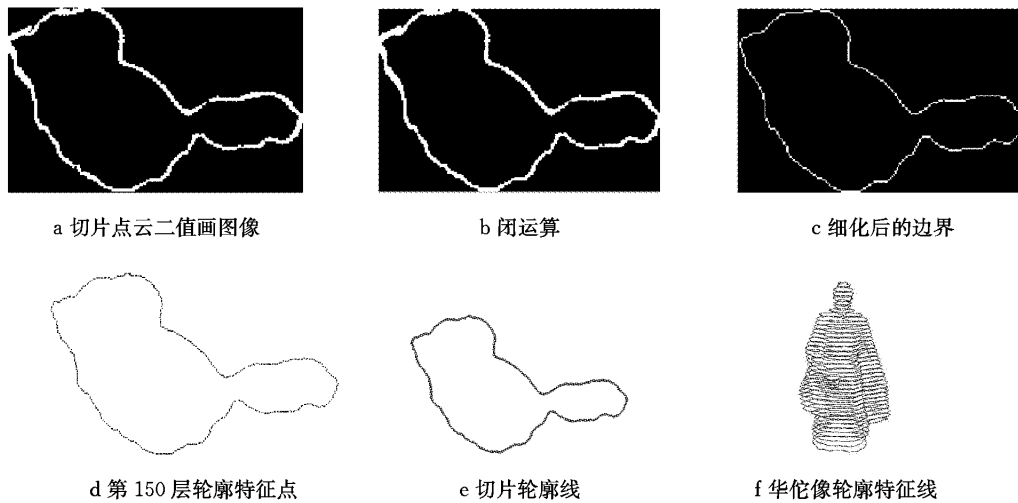


图 6 形态学操作提取轮廓特征

Fig. 6 Extracted contour pixels through morphological processing

“多环”切片点云的轮廓线提取一直是一个比较复杂的问题^[15], 例如文献[16]的迭代凸包法无法提取多环点云轮廓特征. 但是本文基于图像处理的方式的方法能克服这个难题并取得不错的效果. 如图 7a 所示, 茶壶点云被分为 40 层, 第 12 层至第 31 层都

是多环点云, 图 7b 为第 25 层的切片点云二值图像. 最终提取的轮廓特征点如图 7c 所示, 图 7d 是最终拟合的轮廓特征线. 从实验结果可以看出, 本文的方法可以有效解决多环问题.

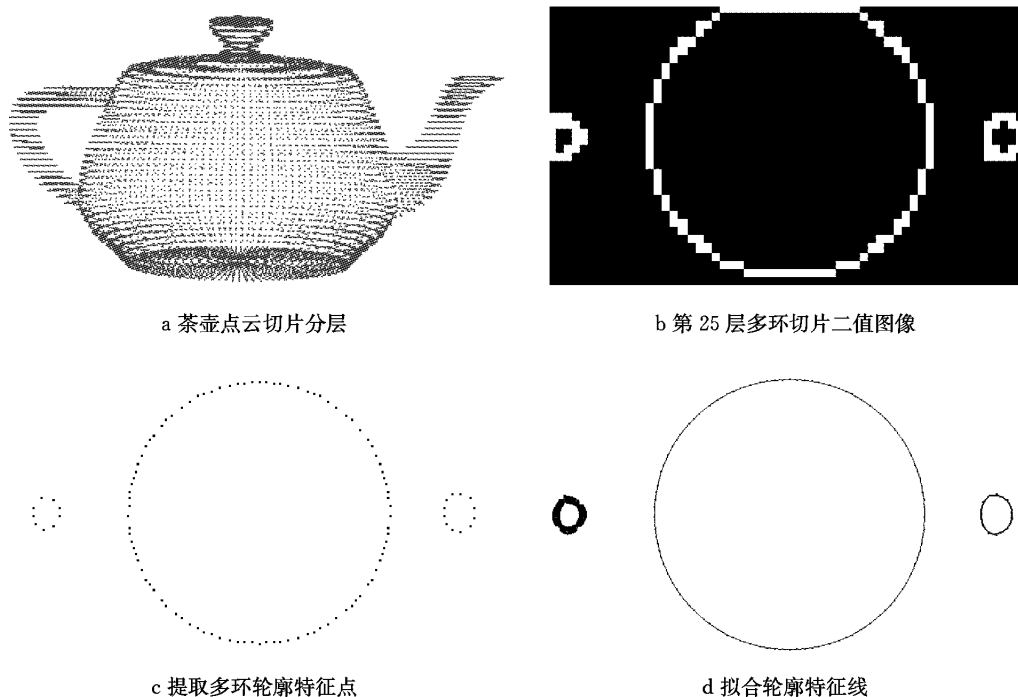


图 7 茶壶点云轮廓特征提取

Fig. 7 Teapot point cloud contour feature extraction

4 结论

直接基于离散点云数据的轮廓特征线提取与基于三角网格模型的提取方法相比计算简便,并避免了转换带来的误差传播和积累. 本文采用快速成型领域的切片技术,将空间散乱的点云转换为序列平面上的切片点云,本文创新之处在于借鉴图像处理技术的思想,使用栅格结构将无序的切片点云组织为二值图像,并利用形态学运算对轮廓区域进行修补和细化,使之完整平滑,然后提取联通像素表示的轮廓特征,这为空间离散点云特征提取和处理提供了一种新思路. 实验结果表明在栅格尺寸定义合理的情况下,本文方法能够提取高质量的轮廓线. 同时,本文方法可以很好解决切片点云出现的多环问题. 得到点云特征轮廓线后可以基于此进行层与层之间的网格重构从而建立整个物体的模型,这种建模方法比起基于空间三角剖分方法更为简洁快速,这将是进一步研究的重要内容.

参考文献:

- [1] 王强,马利庄,鲍虎军. 基于骨架的断层间复杂轮廓线的三角片曲面重构[J]. 计算机学报, 2000(8): 842.
WANG Qiang, MA Lizhuang, BAO Hujun. Skeleton-based triangular surface reconstruction from complex contour lines [J]. Chinese Journal of Computers, 2000(8): 842.
- [2] 郑德华,岳东杰,岳建平. 基于几何特征约束的建筑物点云配准算法[J]. 测绘学报, 2008, 37(4): 464.
ZHENG Dehua, YUE Dongjie, YUE Jianping. Geometric feature constrain based algorithm for building scanning point cloud registration[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(4): 464.
- [3] Pauly M, Keiser R, Gross M. Multi-scale feature extraction on point-sampled surfaces[J]. Computer Graphics Forum, 2003, 22: 281.
- [4] Suchada Rianmora, Pisut Koomsap, Dang Phi Van Hai. Selective data acquisition for direct integration of reverse engineering and rapid prototyping[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2009, 4: 227.
- [5] Liu G H, Wong Y S, Zhang Y F, et al. Error-based segmentation of cloud data for direct rapid prototyping[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(7): 633.
- [6] Wu Y F, Wong Y S, Loh H T, et al. Modelling cloud data using an adaptive slicing approach[J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(3): 231.
- [7] Lee K H, Woo H. Direct integration of reverse engineering and rapid prototyping[J]. Computer & Industrial Engineering, 2000, 38(1): 21.
- [8] 庞旭芳, 庞明勇, 肖春霞. 点云模型谷脊特征的提取与增强算法[J]. 自动化学报, 2010, 36(8): 1073.
PANG Xufang, PANG Mingyong, XIAO Chunxia. An algorithm for extracting and enhancing valley-ridge features from point sets[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(8): 1073.
- [9] Park H T, Chang M H, Park S C. A slicing algorithm of point cloud for rapid prototyping[C/CD]// Proceedings of the 2007 Summer Computer Simulation Conference. San Diego: Society for Computer Simulation International, 2007.
- [10] 冈萨雷斯, 伍兹. 数字图像处理[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2010.
Gonzalez C R, Woods E R. Digital image processing[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [11] Liu G H, Wong Y S, Zhang Y F, et al. Error-based segmentation of cloud data for direct rapid prototyping[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(7): 633.
- [12] Zhou M Y, Xi J T, Yan J Q. Adaptive direct slicing with non-uniform cusp heights[J]. International Journal of Advanced Manufacture Technology, 2004, 23: 20.
- [13] 方芳, 程效军. 海量散乱点云快速压缩算法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2013, 38(11): 1353.
FANG Fang, CHENG Xiaojun. A fast data reduction method for massive scattered point clouds based on slicing[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(11): 1353.
- [14] Piegl L A, Tiller W. Algorithm for finding all k nearest neighbours[J]. Computer-Aided Design, 2002, 34(2): 167.
- [15] QIU Yanjie, ZHOU Xionghui, QIAN Xiaoping. Direct slicing of cloud data with guaranteed topology for rapid prototyping[J]. International Journal of Advanced Manufacture Technology, 2011, 53: 255.
- [16] 刘春, 陈华云, 吴杭彬. 激光三维遥感的数据处理与特征提取[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
LIU Chun, CHEN Huayun, WU Hangbin. 3D laser remote sensing data processing and feature extraction[M]. Beijing: Science Press, 2010.