

# 基于快速成型技术的轮廓线快速生成算法

万程辉<sup>1,2</sup> 程效军<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>同济大学测量与国土信息工程系, 上海 200092  
<sup>2</sup>南昌工程学院水利与环境工程学院, 江西 南昌 330099)

**摘要** 散乱点云数据由于其海量及无拓扑关系等特点,难以直接提取特征线。采用基于快速成型技术提取点云轮廓线算法,首先对点云进行分层,将分层切片内的点云投影到切片平面上,转化为网格图像,采用直线段结构判断连通性,从而生成轮廓线。直线段判断建立连通链表,可快速生成轮廓线,有效解决多连通域问题;网格内点云压缩解决了数据冗余、分布不均匀等问题。实验表明该算法能快速有效生成轮廓线。

**关键词** 快速成型;分层厚度;直线段结构;轮廓线

中图分类号 P237 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.s103001

## Algorithm of Rapidly Generating Contour Line Based on Rapid Prototyping

Wan Chenghui<sup>1,2</sup> Cheng Xiaojun<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Department of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China  
<sup>2</sup>School of Water Resources and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi 330099, China)

**Abstract** It is difficult to extract scattered point cloud feature lines directly due to its characteristic of mass and not topological. A contour generation algorithm for point cloud based on rapid prototyping is described. The approach is that point cloud layers to project onto the slice plane and transform to grid image. It establishes line data structure to extract contour by calculating the domain connectivity. The list of the straight line is adopted to establish connectivity to solve the multi-connected domain problem; the point cloud in cell is compressed to solve the data redundancy and uneven distribution. Experiments show that this method of the contour line generated is rapid and effective.

**Key words** rapid prototyping; layering thickness; line structure; contour

**OCIS codes** 100.2000; 110.1650; 110.3080; 280.3640

## 1 引 言

快速成型(RP)技术以层层叠加原理建立三维实体模型<sup>[1]</sup>。采用 RP 技术与逆向工程技术集成方法对点云分层,建立基于轮廓线的三维模型,以提高算法效率。

生成轮廓线主要有截交法和投影法<sup>[2]</sup>。截交法提出了一种最小距离关联点的方法生成轮廓线<sup>[3]</sup>,根据距离判断关联点,计算这些点的连线与分层平

面的交点,再将这些交点有序化连接得到轮廓线,利用最短距离判断,其计算效率低;Liu 等<sup>[4]</sup>根据曲线拟合提取特征点,将非特征点删除,保留特征点连接成基于点的中间曲线模型(IPCM),所示切片内点云数量较多时,拟合曲线效率不高。投影法是将点云投影在分层平面上,如 Kumbhar 等<sup>[5,6]</sup>将平面上点云转化为网格二值图像,采用图像细化和网格八邻域排序等算法提取图像轮廓。为了提高算法效

收稿日期: 2012-02-10; 收到修改稿日期: 2012-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(40971241)和现代城市测绘国家测绘地理信息局重点实验室(20111205W)资助课题。

作者简介: 万程辉(1975—),男,副教授,博士研究生,主要从事三维激光扫描数据处理与建模等方面的研究。

E-mail: 252203824@qq.com

导师简介: 程效军(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事近景摄影测量与三维激光扫描建模等方面研究。

E-mail: cxj@tongji.edu.cn

率,本文采用网格直线段结构,进行上下行连通性判断,记录直线段连通链表,获取图像特征轮廓,计算网格内特征点,连接成轮廓线。

## 2 点云分层计算

点云分层有两种:1) 等厚度分层,分层算法简单,但分层不够灵活<sup>[7]</sup>;2) 自适应厚度分层,由于表面曲率变化使点云分布不均匀,根据物体表面曲率和投影误差计算分层厚度,而阈值的算法较复杂<sup>[8]</sup>。

根据点云分布间距计算合适的分层厚度,以减少点云平面投影误差,利用最小包围盒对点云进行网格划分<sup>[9]</sup>,通过计算某一点云到周围点云最近距离  $d$  的平均值。网格边长  $L$  可表示为

$$L = k \cdot \frac{1}{n} \sum_i^n d_i, \quad (1)$$

式中  $k$  为边长调节因子,  $n$  为网格内点云数量,通过网格边长约束每个网格内的点云个数,文献<sup>[10]</sup>指出  $n$  在 1~4 比较合理。

在  $z$  轴方向对点云按  $L$  厚度分层,将每层内点云分为一层,对每层的网格内点云数量根据  $k$  值调节,获取合适的分层厚度。

## 3 点云网格像素转换

点云分层后,将网格内点云投影到水平面上,进行网格划分,网格边长为  $L$ ,对网格图像进行栅格二值转化,通过二值像素算法获得  $M \times N$  维二值像素,函数为:

$$I(i, j) = \begin{cases} 1, & (i, j) \in A \\ 0, & (i, j) \in B \end{cases} \quad (2)$$

含有点云的像素网格取值为 1,放在数集  $A$  中;将无点云的网格取值为 0,放在数集  $B$  中。如图 1 所示,点云分布由网格二值属性代替,映射点云投影关系。

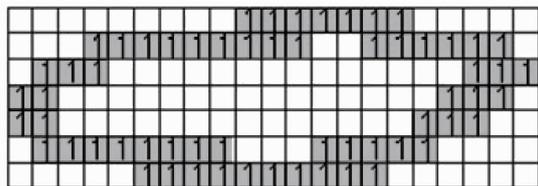


图 1 切片点云投影转换

Fig. 1 Projection transformation of point cloud slice

## 4 点云连通性判断

### 4.1 连通性判断条件

像素直线段通过逐行扫描网格,建立直线段数

据结构<sup>[11]</sup>。例如扫描每行数集  $A$  为 1 的网格  $I(i, j)$ ,以直线段数据结构记录,直线段行顺序标注为编码,当前行  $i$  的直线段  $[i, j, y_a, y_b]$ 。

直线段数据结构定义为:

```
typedef struct line
{int current; // 记录直线段所在行值
int id; // 标记直线段起始编码
int begin; // 记录直线段起始点列值
int end; // 记录下该直线段结束点列值
struct line * next // 指向下一条直线段}
linetype;
```

网格内有多条直线段时,进行连通域判断。如图 2 所示,当前直线段数据结构  $[i, j, y_a, y_b]$  ( $y_a \leq y_b$ ),下一行直线段数据结构  $[i+1, k, y_c, y_d]$  ( $y_c \leq y_d$ ),若符合条件:  $y_a \leq y_d + 1$  且  $y_b \geq y_c - 1$ ,则直线段  $j$  与下一行直线段  $k$  连通。

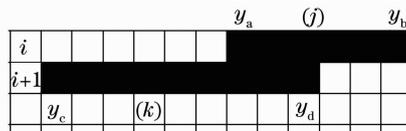


图 2 直线段连通性判断

Fig. 2 Line connectivity judgment

### 4.2 连通域判断

在图 3 中第一行直线段与下一行直线段连通性判断,符合条件的直线段加入相同连通链表①中,符合条件的另一条直线段放入新增加连通链表②中,以此增加链表③、④记录,不符合连通条件的直线段不放入链表,通过循环判断到尾行结束。

多连通域判断,通过连通链表的链表首尾直线段编码,判断是否有相同编码,同时判断是否有一对多关系,类似拓扑关系,建立多连通域和封闭的连通域。图 3 中封闭连通域从第一行直线段开始,通过链表编码判断连接为封闭连通域。

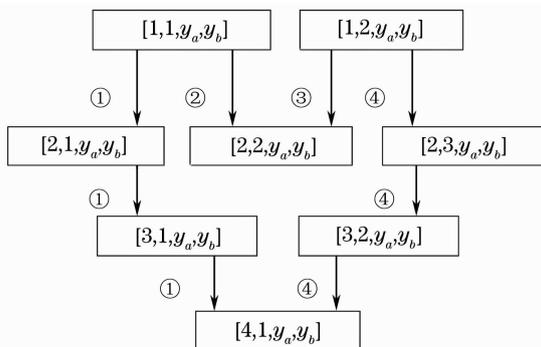


图 3 直线段连通域

Fig. 3 Connected domain of line segments

## 5 轮廓线特征提取与生成

### 5.1 轮廓点云特征提取

切片内点云轮廓特征的提取,如图4中将上下行直线段内连通网格合并,使上下行直线段合并成一个网格形式,获得轮廓线特征位置。

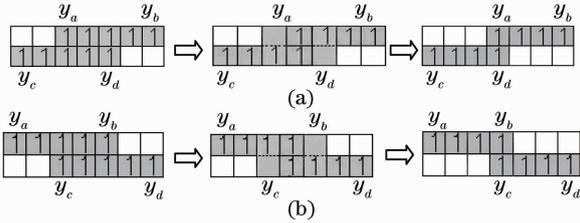


图4 直线段连通网格合并。(a)左连通;(b)右连通

Fig. 4 Cell merged of line segment connecting.

(a) Left connectivity; (b) right connectivity

将网格内点云压缩成一个特征点,取点云重心坐标,计算公式为

$$\bar{x}_{I(i,j)} = \frac{\sum x_k}{n}, \quad (3)$$

$$\bar{y}_{I(i,j)} = \frac{\sum y_k}{n}.$$

### 5.2 特征点生成轮廓线

由直线段链表获取轮廓线每个网格列值,计算每个网格重心坐标为轮廓线特征点,根据链表顺序生成轮廓线,流程如图5所示。

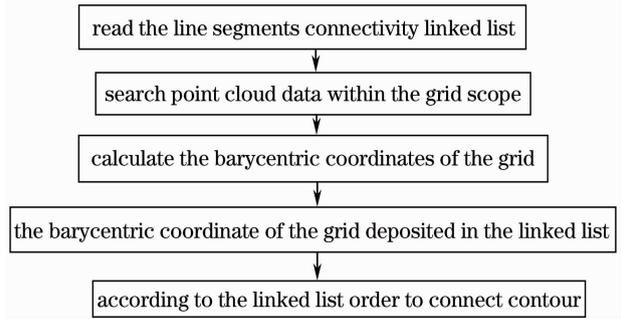


图5 生成轮廓线流程

Fig. 5 Flowchart of generating contour line

## 6 算法验证

采用 Visual C++ 6.0 与 Coin3D 在计算机(PC)上实现和验证算法。选取密度不同的两组点云为实验对象,如图6所示,两组对象分别包括点云与轮廓线模型。

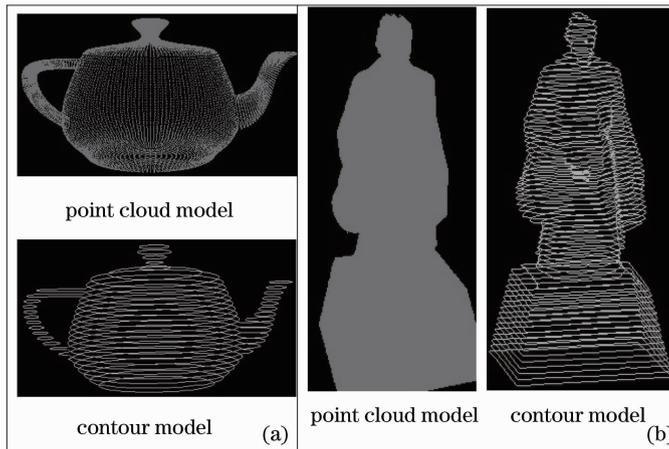


图6 点云生成轮廓线。(a)茶壶模型;(b)华佗雕像模型

Fig. 6 Point cloud generated contour. (a) Teapot model; (b) Huatuo statue model

### 6.1 茶壶模型

茶壶模型为规则点云,数量为26,103个,高度为0.4 m,按z轴方向分为27层,分层厚度设置为0.015 m。图7(a)提取了第22层点云数据,点云数量为874个,在水平面上投影点云平均间距为0.01 m,设置k=1.5,网格边长L=0.015 m。图7(b)所示该层轮廓线由3组点云形成,存在多连通域情况,通过直线段多连通域的判断,可得3个封闭轮廓线。

### 6.2 华佗雕像模型

华佗雕像模型为散乱点云,数量为708,987个,

高度为3.2395 m,按z轴方向分为63层,分层厚度设置为0.05 m。在水平面上投影点云平均间距为0.005 m,设置k=10,L=0.05 m。图8(a)中提取第40层切片,点云数为11952个,网格内点云数量为22~265个,该层点云存在缺失情况。根据直线段的连通判断,对于点云缺失的部分不能构成封闭轮廓,通过网格范围内搜索连通链表进行连接,如图8(b)所示,在提取网格特征点后,连接成封闭的轮廓线。

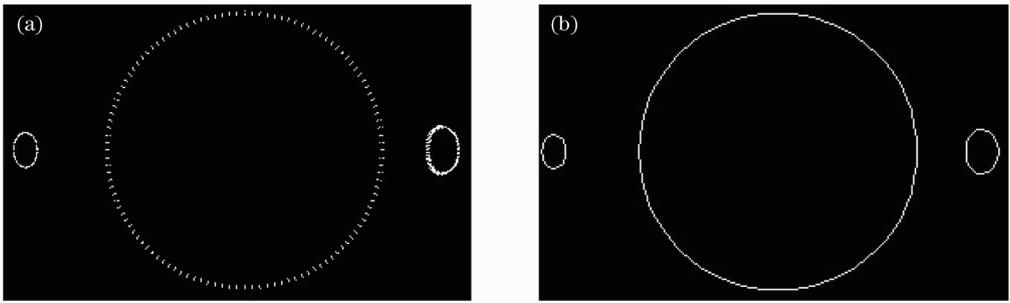


图 7 茶壶多连通轮廓线。(a)切片内点云;(b)轮廓线连接

Fig. 7 Multiply connected contour of the teapot. (a) Point cloud inside slice; (b) contour connection

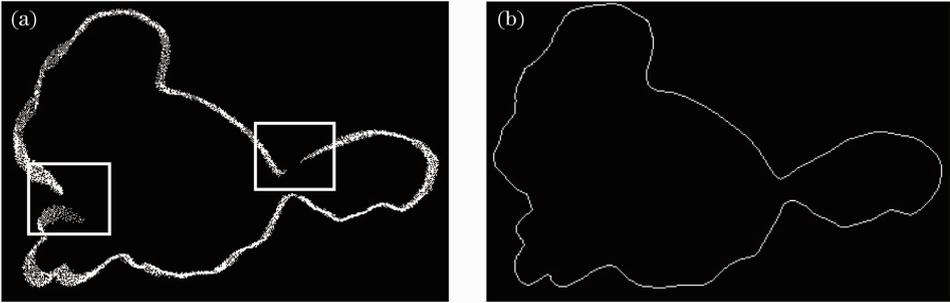


图 8 缺失点云的轮廓线。(a)点云缺失;(b)封闭轮廓线

Fig. 8 Contour of missing point cloud. (a) Point cloud missing; (b) closed contour

### 6.3 网格内特征点精度

图 9 中连通网格分别由 3 个网格组成,网格内 9 个点云生成 3 个特征点,点云压缩率达到 66.7%。网格内点云压缩与分层厚度以及网格边长有关,随着点云压缩,造成轮廓线精度损失。如华佗雕像以 0.05 m 间隔高度的轮廓线表示三维模型,显得不够精细;同时网格边长设置为 0.05 m,点云压缩较大,轮廓线特征点减少,表现模型细节不够详细。因此通过分层厚度与网格边长调节,获取所需的轮廓特征线。

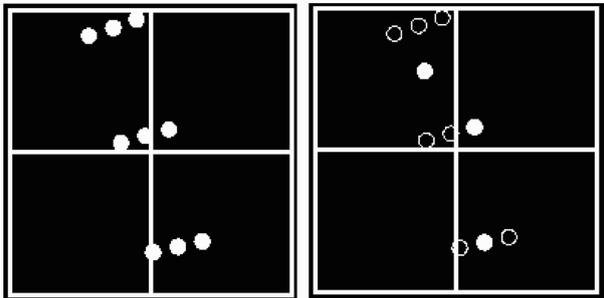


图 9 网格内点云压缩

Fig. 9 Compression of point cloud in cell

## 7 结 论

针对地面三维激光扫描获得的点云,提出基于切片快速生成物体轮廓线,解决的主要问题有:1) 点云  $\approx$  轴方向分层切片,投影到切片平面上,转化为

网格图像二值化;2) 采用直线段结构记录轮廓位置,进行连通性判断记录连通链表;3) 通过连通链表建立类似拓扑直线关系,判断连通封闭情况,以及多连通情况;4) 对上下行连通网格合并,提取轮廓带状链表,计算网格内点云重心坐标为轮廓特征点。实验表明,该算法采用网格直线段链表,减少网格搜索时间,同时对网格内点云进行压缩,不仅保留了特征点,而且压缩率高,快速生成物体轮廓线三维模型。

### 参 考 文 献

- 1 H. K. Lee, H. Woo. Direct integration of reverse engineering and rapid prototyping[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2000, **38**(1): 21~38
- 2 Zhao Jibin, Liu Weijun. Recent progress in slicing algorithm of rapid prototyping technology [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2009, **15**(2): 209~221  
赵吉宾, 刘伟军. 快速成型技术中分层算法的研究与进展[J]. *计算机集成制造系统*, 2009, **15**(2): 209~221
- 3 Sun Yuwen, Jia Zhenyuan, Wang Yuechao *et al.*. Rapid prototyping manufacturing based on point cloud data from free-form surface[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, **39**(1): 56~60  
孙玉文, 贾振元, 王越超 等. 基于自由曲面点云的快速原型制作技术研究[J]. *机械工程学报*, 2003, **39**(1): 56~60
- 4 G. H. Liu, Y. S. Wong, Y. F. Zhang *et al.*. Error-based segmentation of cloud data for direct rapid prototyping [J]. *Computer-Aided Design*, 2002, **35**(7): 633~645
- 5 V. K. Kumbhar, P. M. Pandey, P. V. M. Rao. Improved intermediate point curve model for integrating reverse engineering and rapid prototyping [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*,

- 2008, **37**(5): 553~562
- 6 Y. F. Wu, Y. S. Wong, H. T. Loh *et al.*. Modeling cloud data using an adaptive slicing approach[J]. *Computer-Aided Design*, 2004, **36**(3): 231~240
- 7 Wu Hangbin, Liu Chun. Point segmentation and edge detection of LIDAR data based on the mathematical morphology [J]. *Remote Sensing Information*, 2008, (4): 27~32  
吴航彬, 刘 春. 基于数学形态学的 LIDAR 数据分割和边缘提取[J]. *遥感信息*, 2008, (4): 27~32
- 8 Y. J. Qiu, X. H. Zhou, X. P. Qian. Direct slicing of cloud data with guaranteed topology for rapid prototyping[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2011, **53**(1): 255~265
- 9 L. A. Piegl, W. Tiller. Algorithm for finding all k nearest neighbors[J]. *Computer-Aided Design*, 2002, **34**(2): 167~172
- 10 Liu Yunfeng, Ke Yinglin. Hybrid slicing technology in reverse engineering[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2003, **15**(6): 741~745  
刘云峰, 柯映林. 反求工程中的混合切片技术[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2003, **15**(6): 741~745
- 11 Zhang Shusheng. A fast detecting approach to binary image connected components with line based label propagation [J]. *Computer Research and Development*, 1994, **31**(10): 51~54  
张树生. 一种基于线的标号传播二值图象连通体快速检测方法[J]. *计算机研究与发展*, 1994, **31**(10): 51~54

栏目编辑:马 沂