

# 基于代数曲面的残缺点云数据迭代修复算法

胡少乾,周来水,闫杰琼,文思扬,穆冬梅  
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘 要:**针对逆向工程领域,激光扫描仪获取的散乱点云数据难免存在着残缺的问题,设计一种迭代修复残缺点云孔洞的算法,对其进行下采样,基于加权局部最优投影算子得到分布均匀的稀疏点集;将点沿稀疏点集的代数点集曲面排斥推向残缺区域;对稀疏点集进行上采样完成孔洞区域的一次修复。将上述步骤迭代应用,逐渐缩小残缺区域,直到完成修复。研究表明:该方法对表面曲率连续的残缺点云模型可自适应完成修复,恢复原有残缺区域的几何信息。

**关键词:**残缺点云数据;点云修复;代数点集曲面;点云上采样

**中图分类号:**TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)02-0083-04

## Iterative Repair Algorithm for Incomplete Point Cloud Data Based on Algebraic Point Set Surface

HU Shaoqian, ZHOU Laishui, YAN Jieqiong, WEN Siyang, MU Dongmei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** To address the incomplete scattered point cloud data obtained by laser scanner in the field of reverse engineering, an iterative algorithm to repair the holes in the residual cloud is designed. The sparse point set is downsampled, and the uniformly distributed sparse point set is obtained based on the weighted local optimal projection operator. The points are pushed to the incomplete area along the algebraic point set surface of the sparse point set. The sparse point set is upsampled to complete the repair of the hole area. The above steps are applied iteratively to reduce the incomplete area gradually until the repair is completed. The research shows that the method can adaptively repair the incomplete point cloud model with continuous surface curvature, and recover the geometric information of the original incomplete area.

**Keywords:** residual point cloud; point cloud repair; algebraic point set surfaces; point cloud up sampling

## 0 引言

随着数字化测量技术的发展,通过三维激光扫描仪获取的实物外形点云数据在逆向工程<sup>[1]</sup>领域有着广泛的应用。但由于扫描过程中光线遮挡、实物外表反射率不一致、实物残缺等原因,获取的点云数据表面难免存在着孔洞,残缺的点云数据直接用于模型重建会丢失模型原有几何信息,因此需要先修复残缺点云数据,为后续逆向工程中点云数据的模型重建提供基础。

相关学者对残缺点云数据的修复算法进行了大量研究。该方法主要分为两类:一类基于三角网格<sup>[2-4]</sup>对点云残缺孔洞进行修补,该方法是在点云三角化过程中对出现的孔洞进行填补,该算法的复杂度较高,当点云数据量较大时,运算量较大,难以取得理想的效果。另一类直接对点云模型进行残缺孔洞修复。晏海平等<sup>[5]</sup>以残缺孔洞边界点和边界周围的散乱点为依据在残缺区域拟合曲面片,并在曲面片上采样相应的点,从而完成点云残缺孔洞的修复,孔洞修复结果很大程度上受拟合曲面片的函数影响。YUMER M E 等<sup>[6]</sup>基于前馈神经网络完成对残缺孔洞的

修补,该方法的效果受限于神经网络的训练集,且训练集的制作是极为复杂的工作。上述现有算法适合对曲率变化小、残缺孔洞面积较小的点云数据修复,但对缺失面积较大、曲率变化大的点云表面修复效果较差。

针对上述问题,提出了一种通过迭代修复残缺点云数据的算法,能对缺失十分严重且曲率变化较大的残缺点云进行有效修复。本文以三维激光扫描仪获取的航空发动机外形点云数据为对象,进行了相关实验,验证了该方法的有效性。

## 1 算法流程

假设三维激光扫描仪获取的带有孔洞的点云数据为  $P = \{p_i\}$ ,  $p_i \in R^3$ , 从原始数据中进行表面重建会导致错误的结果。本文提出的方法旨在修复  $P$  残缺区域。如图 1 所示,算法具体步骤为:1) 首先随机下采样  $m$  个点,得到点集  $X$ ,并基于加权局部最优投影(weighted locally optimal projection, WLOP)算子使其重分布。由文献[7]可知,加权局部最优投影算子可使点集分布均匀;2) 将均匀分布的点沿稀疏点集  $X$  的代数曲面排斥推向残缺区域。由文

**基金项目:**国家自然科学基金项目(52075258)

**第一作者简介:**胡少乾(1995—),男,河北保定人,硕士研究生,研究方向为数字化设计与制造。

献[8]可知,点集的代数曲面(algebraic point set surfaces, APSS)在残缺孔洞处能很好拟合残缺孔洞的几何信息;3)最后对 $\mathbf{X}$ 进行上采样,得到稠密点集 $\mathbf{Y}$ ,选择点集 $\mathbf{Y}$ 中新增区域的点为 $\mathbf{P}^i$ ,合并到点集 $\mathbf{P}$ 中。将上述步骤迭代应用于点集 $\mathbf{P}$ ,直到达到修复条件,终止迭代,输入完整的点云。由实验经验可知,当第 $i$ 次迭代新增点数量少于前次的20%时,则表明修复了点云残缺孔洞,即:本算法的迭代终止条件为 $\frac{|\mathbf{P}^{i-1}| - |\mathbf{P}^i|}{|\mathbf{P}^{i-1}|} < 20\%$ 。

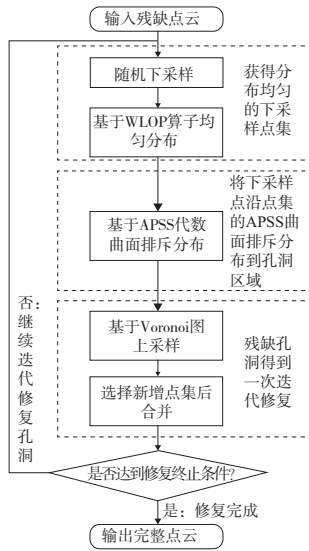


图1 本文算法流程图

该算法采取迭代的方式自适应修复残缺孔洞区域,最终得到残缺数据修复的点集 $\mathbf{P}'$ 。在上述算法中对整个点集 $\mathbf{P}$ 和稀疏点集 $\mathbf{X}$ 重复应用下采样和上采样,然而通过实验发现,在将点集 $\mathbf{X}$ 推向数据残缺区域时,只有临近残缺区域边界的点被推向了残缺孔洞,对整个点集进行上述处理增加了算法的复杂度。因此,为了减少冗余计算,除第一次迭代对整个点集进行处理外,之后每次迭代只对新增区域的点集进行处理,后续章节中介绍了自适应选择新增点集的办法。该算法伪代码如下所示。

伪代码:残缺点云数据的迭代修复算法

```

1: 输入原始点云  $\mathbf{P}$ , 令  $i=0, \mathbf{p} \Rightarrow \mathbf{p}^i$ 
2: 对点云  $\mathbf{p}^i$  下采样  $m$  个粒子, 得到点集  $\mathbf{X}$ , 令  $\mathbf{X} \Rightarrow \mathbf{X}^0$ ;
3: while 未达残缺修复条件 do;
4: 令  $\mathbf{X} \Leftarrow \mathbf{X} \cup \mathbf{X}^i$ ;
5: 使用 WLOP 算子使  $\mathbf{X}$  均匀分布;
6: 基于 APSS 曲面, 将点集  $\mathbf{X}^i$  中的点推向数据残缺区域;
7: 基于 Voronoi 图对点集  $\mathbf{X}^i$  进行点插值得到上采样点集  $\mathbf{Y}^i$ ;
8: 选择点集  $\mathbf{Y}^i$  中新增区域的点为活动点集, 令其为  $\mathbf{p}^{i+1}$ ;
9: 令  $i \Leftarrow i+1, \mathbf{p} \Leftarrow \mathbf{p} \cup \mathbf{p}^i$ ;
10: 对点集  $\mathbf{p}^i$  下采样  $m^i$  个粒子, 得到点集  $\mathbf{X}^i$  (其中  $m^i = 2m \cdot |\mathbf{p}^i| / |\mathbf{p}^0|, 1 \dots i$  表示点集中点的数量);
11: end while
12: return 输出修复点云  $\mathbf{P}'$ , 结束。

```

## 2 算法实现

### 2.1 下采样和均匀分布

算法迭代中,每次随机下采样从 $\mathbf{p}^i$ 中选择 $m^i$ 个点得

到点集 $\mathbf{X}^i$ 。其中 $m^i = 2m \cdot |\mathbf{p}^i| / |\mathbf{p}^0|$ ,  $m$ 表示第一次下采样迭代时下采样的点数,当 $m$ 太小时容易丢失给定点集上的细节特征,而 $m$ 值过大会增加运算时间。因此,根据经验将其设置为: $m = \frac{1}{20} |\mathbf{p}^0| \sim \frac{1}{5} |\mathbf{p}^0|$ 。为保证下采样点集保持原数据几何信息并且分布更加均匀,利用 WLOP 算子对下采样点集进行重新分布。

### 2.2 基于点集代数曲面的排斥分布

为了完成残缺区域的修复,本文引入了一个排斥算子将点移动到点云残缺的区域。从已知区域向外平滑扩展是用来填补数据缺失区域的很好方式,即:从已知表面沿其切向外扩展原有有点集所定义的表面。为保证残缺孔洞处的修补点能很好拟合原残缺孔洞的几何信息,将点沿点集的代数曲面推向残缺孔洞区域。点集的排斥分布示意图如图2所示(本刊黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。

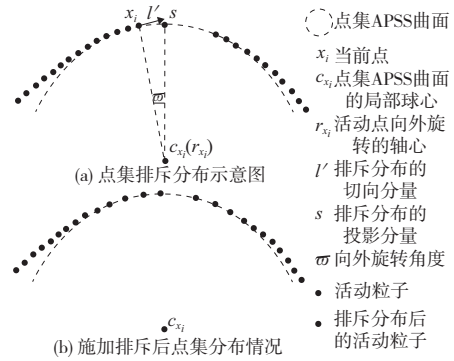


图2 点集排斥分布示意图

在 $\forall x_i \in X^i$ 上定义的 APSS 曲面,通过排斥的方式将点沿着 APSS 曲面移动。移动方向由切向分量和投影分量两部分组成。点 $x_i$ 的切向分量由通过 APSS 曲面的半径 $r$ 沿其过球心的轴 $r_{x_i}$ 向外旋转来确定的。为保证排斥后的点集能均匀分布,切向分量的公式类似 WLOP 算子的均匀项,定义如下:

$$l = \mu \sum_{x_p \in (X \setminus \{x_i\})} (x_i - x_p) \frac{w_p l}{\sum_{x_p \in (X \setminus \{x_i\})} w_p l} - x_i \quad (1)$$

式中: $x_i$ 为当前点; $\mathbf{X}$ 为稀疏点集; $w_p$ 为点集的类似于 WLOP 算子中的密度权重项; $\mu$ 为平衡系数。

$$l = \theta(\|x_i - x_p\|) / \|x_i - x_p\| \quad (2)$$

$$\theta(r) = e^{-r^2 / (h/4)^2} \quad (3)$$

通常 $l$ 并不垂直于在 $x_i$ 处的法向量 $\mathbf{n}_{x_i}$ ,因此通过计算 $\mathbf{n}_{x_i}$ 的正交向量,最终确定其切向分量为

$$l' = l - (l \cdot \mathbf{n}_{x_i}) \mathbf{n}_{x_i} \quad (4)$$

可得旋转角度为

$$\varpi = \frac{\|l'\|}{2\pi \|x_i - c_{x_i}\|} \quad (5)$$

在对粒子 $x_i$ 施加切向分量后,对其施加投影分量,将其向点集定义的 APSS 曲面投影,以确保点沿着 APSS 曲面移动,投影分量定义为

$$s = c_{x_i} + r(x_i) \frac{x_i - c_{x_i}}{\|x_i - c_{x_i}\|} - x_i \quad (6)$$

对点施加切向分量和投影分量移动后,完成排斥分布,点云粒子将分布于数据残缺区域,但需要注意的是,只使用一次排斥并不能填补整个残缺数据,这是因为由 APSS 定义的曲面并不能完全表示残缺区域。因此在后续步骤完成后需要继续将点集推向残缺区域,以完成残缺数据的修复。

### 2.3 上采样及点集合并

点集  $\mathbf{X}^i$  为稀疏的点集,被排斥分布到残缺区域后,需对其进行上采样,从而得到分布于残缺区域的稠密点集。Voronoi 图的顶点位于近邻点的中心,因此基于 Voronoi 图的上采样点能均匀分布在  $\mathbf{X}^i$  定义的光滑表面上并且保持原有数据结构。上采样步骤如图 3 所示,上采样点是其近邻 3 个点的外接圆的圆心,即:点集 Voronoi 图的顶点。不断重复计算新增点位置,得到稠密的点集。

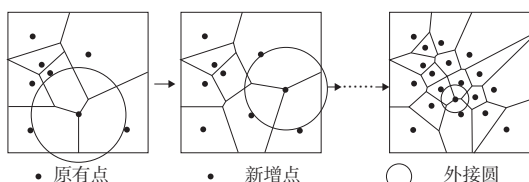


图3 基于 Voronoi 图的上采样

上采样后点集为  $\gamma^i$ , 选择  $\gamma^i$  中位于新增区域的点为  $\mathbf{P}^{i+1}$ , 将其合并到点集  $\mathbf{P}$  中, 形成新的点集, 令其为  $\mathbf{P}$ , 令  $i \leftarrow i+1$ 。由于在将点集排斥分布时, 只有临近残缺区域边界附近的点集被移动到了残缺孔洞处, 新增区域点位于残缺孔洞周围。因此在计算下一次迭代时, 只对新增区域的点进行处理可以提高算法运算效率并将满足以下条件的点视为新增区域的点, 合并到点集  $\mathbf{P}$  中:

$$\forall q_j \in \gamma^i, \exists p_i \in \mathbf{P}, \text{使得 } \|q_j - p_i\| > \frac{1}{2} L_{\text{avg}}^{\mathbf{P}}。$$

该条件自适应的选择出了新增区域的点。其中  $L_{\text{avg}}^{\mathbf{P}}$  是点集  $\mathbf{P}$  中所有点到最近邻点距离的平均值。通过实验发现,  $L_{\text{avg}}^{\mathbf{P}}$  值大小对最后的残缺区域修复结果并没有显著影响,  $L_{\text{avg}}^{\mathbf{P}}$  主要影响了残缺区域的修复速度。完成上采样和点集合并后点云残缺区域面积缩小, 残缺点云完成了一次修复, 重复迭代即可修复整个残缺区域。

## 3 综合实验

为了证明本文算法的有效性, 本节对航空发动机外形实测点云数据进行了实验。如图 4 所示, 为航空发动机机匣表面残缺孔洞, 对其进行 20 次迭代后, 完成了该区域数据的修复。随着迭代的进行, 点集被不断排斥分布到残缺区域, 残缺区域面积逐渐缩小直到完成修复。

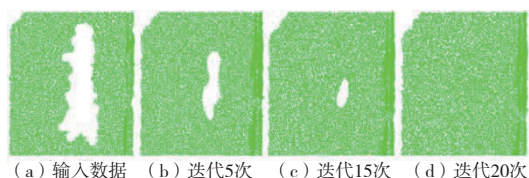


图4 机匣表面数据迭代修复结果

图 5 所示为航空发动机的管路点云数据。由于管路紧紧依附于发动机表面, 只能获取管路一侧的测量数据, 管路数据残缺十分严重。该算法对管路点云模型进行了 15 次迭代, 获得了较为理想的完整点云模型。

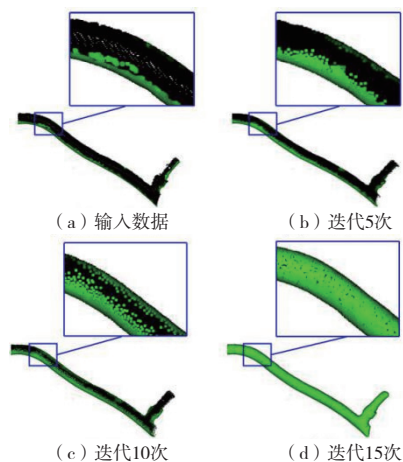


图5 管路数据迭代修复结果

图 6 展示了管路的原始数据和使用本文算法修复后的数据进行泊松重建的结果, 并放大了局部细节。直接使用原始数据进行泊松重建后模型表面发生了塌陷, 而重采样后的数据再进行泊松重建后, 模型较好地保持了管路原有特征结构。说明本文算法修复能够有效修复残缺数据, 对修复后的数据进行重建保留了实物更完整的信息。

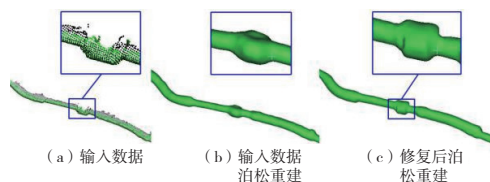


图6 管路数据修复前后重建结果

图 7 为对比了航空发动机外形点云数据使用上述算法处理的前后效果。结果显示, 该算法修复了发动机表面残缺区域。对原始数据和使用该算法修复后的数据进行了泊松重建。结果显示, 原始数据泊松重建后, 残缺区域模型塌陷严重; 对修复后的数据进行重建, 重建结果保持了发动机表面的轮廓几何特征。

上述实验说明本文算法可以有效修复残缺点云数据, 恢复原有几何信息, 获得一个完整的高质量点云数据。

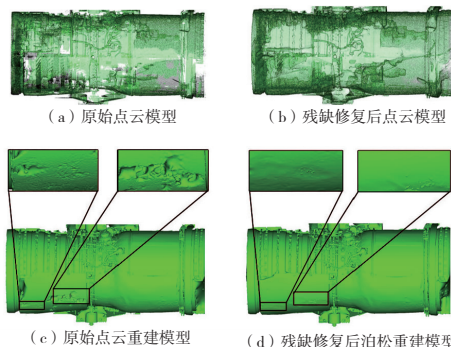


图7 航空发动机外形点云数据修复前后对比

## 4 结语

本文提出了基于代数曲面的残缺点云数据迭代修复算法。通过迭代的方式不断缩小点云残缺区域的面积,直到修复残缺点云数据。本文以航空发动机外形点云数据为对象进行了实验,实验表明该算法对曲率连续点云表面的有效性。该方法不仅能修复曲率变化不大的机匣点云残缺孔洞,还对曲率变化较大的航空发动机管路模型十分有效。使用本文方法修复的航空发动机实测外形点云数据,较好地恢复了残缺区域的几何信息,为逆向工程中发动机数字样机的构建提供了基础。

### 参考文献:

- [1] 石诺. 基于逆向工程的三维数字化测量技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- [2] MARCHANDISE E, PIRET C, REMACLE J F. CAD and mesh repair with Radial Basis Functions[J]. Journal of Computational Physics, 2012, 231(5): 2376-2387.

- [3] 吴晓婧. 三角网格孔洞修补算法研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
- [4] 吴晓婧, 寿华好, 邵茂真. 用内法向量与二次误差度量修补三角网格孔洞[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2020, 32(2): 239-245.
- [5] 晏海平, 吴禄慎, 陈华伟. 基于径向基函数的散乱点云孔洞修复算法[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(4): 1253-1257.
- [6] YUMER M E, KARA L B. Surface creation on unstructured point sets using neural networks[J]. Computer-Aided Design, 2012, 44(7): 644-656.
- [7] HUANG H, LI D, ZHANG H, et al. Consolidation of unorganized point clouds for surface reconstruction[J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(5): 1-7.
- [8] GUENNEBAUD G, GERMANN M, GROSS M. Dynamic sampling and rendering of algebraic point set surfaces[J]. Computer Graphics Forum, 2008, 27(2): 653-662.

收稿日期: 2021-01-27

(上接第 74 页)

## 2.6 齿轮加工成果

利用数控机床对 20CrMoTi 碳钢毛坯进行加工, 最终得到的成品如图 4 所示。



图 4 大模数圆柱齿轮成品示意图

## 2.7 齿轮加工精度检验

对图 4 所示的大模数圆柱齿轮成品进行精度检验, 判断成品精度是否达到合格标准。检验结果如表 7 所示。

表 7 齿轮加工精度检验结果

| 类别   | 指标        | 数值/ $\mu\text{m}$ | 是否合格 |
|------|-----------|-------------------|------|
| 齿形误差 | 齿面齿廓总偏差   | 8.6               | 合格   |
|      | 齿廓倾斜偏差    | 2.5               | 合格   |
|      | 齿廓形状偏差    | 3.8               | 合格   |
| 齿向误差 | 齿轮螺旋线总公差  | 2.7               | 合格   |
|      | 齿轮螺旋线形状公差 | 4.3               | 合格   |
|      | 齿轮螺旋线倾斜偏差 | 3.3               | 合格   |

将表 7 中的结果与表 3 齿轮精度合格标准表进行对比, 可知所研究工艺加工的齿轮齿形误差和齿向误差各项指标均小于规定的范围, 精度较高, 达到合格标准。由此

说明该加工方法具有广阔的应用前景。

## 3 结语

本文基于数控加工的大型齿轮加工成形方法研究, 通过数控机床的自动化、智能化生产提高齿轮加工精度。最后通过实例进行加工工艺精度验证, 通过加工一个大模数圆柱齿轮证明了所研究加工工艺的精度, 研究结果对于齿轮制造领域具有一定的参考价值。本研究还有待完善的地方, 仅将加工工艺应用到一种类型的齿轮加工当中, 得到的精度结果具有局限性。因此需提高本研究的适用范围, 还需要进一步测试和验证。

### 参考文献:

- [1] 党玉功, 高振山, 卢杨奔, 等. 准双曲面齿轮冷摆辗加工多目标工艺优化分析[J]. 机械传动, 2019, 43(1): 140-143, 176.
- [2] 冯玮, 许思佳, 李明丽. 浮动凹模热精密成形圆柱斜齿轮微观组织演化规律的研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(3): 149-152.
- [3] 段振云, 侯超群, 赵文珍, 等. 内齿轮电火花成型铣削加工工艺[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(33): 110-114.
- [4] 杨剑波. 造林机械的齿轮成型工艺与数字化建模研究[J]. 林产工业, 2020, 57(1): 65-66, 69.
- [5] 郭开元, 张如华. 从动螺旋锥齿轮双向对挤高效精密成形新工艺研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(1): 142-144.
- [6] 李梅, 王强. 基于齿端分流工艺的汽车变速器齿轮挤压成形模拟分析[J]. 热加工工艺, 2020, 49(17): 125-127.
- [7] 王莹琚, 朱春东, 高玉凡, 等. 双辊摆辗螺旋锥齿轮成形工艺参数优化[J]. 锻压技术, 2019, 44(5): 51-56.
- [8] 郭二廓, 任乃飞, 王杰, 等. 锥形多刃刮齿刀具切削成形过程仿真分析[J]. 机械传动, 2019, 43(11): 121-125.

收稿日期: 2021-04-19