

DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2023.3.13

## 基于自适应邻域的非均匀点云数据封装方法

郭敏<sup>1</sup>, 张文丽<sup>1</sup>, 吕源治<sup>2</sup>, 李贞兰<sup>3\*</sup>

(1.长春工业大学 计算机科学与工程学院, 吉林 长春 130102;  
2.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
3.吉林大学白求恩第一医院, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 针对密度非均匀点云重建时难以控制网格生长范围的问题, 研究了一种基于自适应邻域的非均匀点云数据封装方法。首先根据点云密度自适应地调整空间搜索球半径, 然后利用投影法将邻域投影到二维平面, 再根据约束准则寻找最优扩展点, 逐步构建出网格曲面, 最后利用孔洞修补方法修补网格中的孔洞。实验结果表明, 该算法能够有效控制网格生长范围, 构建出表达细节特征的网格曲面。

**关键词:** 区域生长; 自适应邻域; 投影; 最优扩展点

**中图分类号:** TP 391.41      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-1374(2023)03-0276-06

## An adaptive neighborhood-based method for encapsulating non-uniform point cloud data

GUO Min<sup>1</sup>, ZHANG Wenli<sup>1</sup>, LYU Yuanzhi<sup>2</sup>, LI Zhenlan<sup>3\*</sup>

(1.School of Computer Science & Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130102, China;  
2.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
3.The First Bethune Hospital of Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that it is difficult to control the mesh growth range during density non-uniform point cloud reconstruction, a non-uniform point cloud data encapsulation method based on adaptive neighborhood is studied. Firstly, the radius of the spatial search sphere is adjusted adaptively according to the density of the point cloud, and then the neighborhood is projected to the two-dimensional plane by the projection method, and then the optimal expansion point is found according to the constraint criterion, the mesh surface is gradually constructed, and finally the hole repair method is used to repair the holes in the mesh. Experimental results show that the algorithm can effectively control the mesh growth range and construct a mesh surface that expresses detailed features.

**Key words:** regional growth; adaptive neighborhood; project; optimal extensibility point.

收稿日期: 2022-11-10

基金项目: 吉林省发改委产业技术与开发项目(2022C043-8); 长春市重大专项(21GD01)

作者简介: 郭敏(1984-), 女, 汉族, 山东济宁人, 长春工业大学讲师, 博士, 主要从事三维图像处理 and 机器视觉方向研究, E-mail: guomin@ccut.edu.cn. \*通信作者: 李贞兰(1966-), 女, 朝鲜族, 吉林长春人, 吉林大学教授, 博士, 吉林大学白求恩第一医院主任医师, 主要从事神经系统疾病大脑可塑性和医学图像处理方向研究, E-mail: zhenlanli66@163.com.

## 0 引言

随着三维激光扫描技术的日益成熟,极大地推动了三维重建技术在文物保护、虚拟现实和逆向工程等领域的发展<sup>[1-3]</sup>。近年来,点云网格化作为三维重建技术的重要处理步骤,被众多研究人员关注。

目前,常用的点云网格化方法主要有3类:基于隐式曲面的方法、基于投影的方法和基于区域生长的方法<sup>[4-7]</sup>。其中,基于区域生长算法由于思路简单、时间复杂度低的优点被广泛应用。区域生长算法从种子三角形<sup>[8]</sup>开始,根据一定的约束准则获取最优点<sup>[9]</sup>,实现网格生长。许多学者针对如何选取网格生长范围进行了研究,Bernardinit F等<sup>[10]</sup>提出BPA方法,通过人为定义滚球半径获取网格生长范围,在点云稀疏区域会出现孔洞。邱春丽等<sup>[9]</sup>提出基于动态球搜索邻域的算法,能够构建平滑曲面,但是在孔洞周围会生成错误三角形。付永健等<sup>[11]</sup>提出根据内在属性因子和扩展边关系自适应确定网格生长范围的方法,对于含有孔洞的点云,网格曲面质量会降低。实际应用中,在扫描形状较为复杂的模型时,由于存在视线死角或模型表面粘贴标识点,导致获得的点云数据存在孔洞,且点云分布不绝对均匀<sup>[12]</sup>。张丽艳等<sup>[13]</sup>、李松等<sup>[14]</sup>基于最小角度法修补孔洞,其过程主要分为识别边界、计算孔洞边界夹角和修补孔洞三个步骤。传统的区域生长方法在处理密度非均匀点云时,难以控制网格生长范围,易出现孔洞和网格错乱现象,降低重建精度。

针对上述问题,提出一种基于自适应邻域的非均匀点云数据封装方法,该算法通过点云密度自适应选择合适的空间搜索球半径,控制网格生长范围,优化了最优扩展点的选取,从而减少网格孔洞数量,避免了网格错乱现象。

## 1 基于自适应邻域的点云网格化算法

基于自适应邻域的非均匀点云数据封装算法整体流程如图1所示。

首先构建种子三角形;其次提取一条边界边,并自适应搜索边界边顶点的邻域;然后将邻域投影到二维平面,计算出投影坐标;再根据约束准则找出最优扩展点,与边界边形成新的三角形,重复之前的步骤,直到边界边列表为空;最后修补网格

曲面中的孔洞。

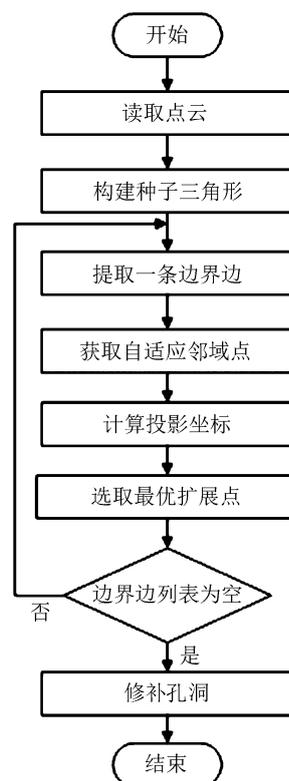


图1 算法整体流程

网格质量的评价指标通常为三角形的正则度,即三角形接近正三角形的程度。文中通过三角形内角的余弦和进行计算,

$$g = 2 * (\cos\alpha + \cos\beta + \cos\lambda - 1), \quad (1)$$

式中: $\alpha, \beta, \lambda$ ——三角形的内角;

$g$ ——三角形正则度, $0 < g \leq 1$ , $g$ 越接近1,三角形正则度越好。

### 1.1 构建种子三角形

为了避免种子三角形穿过网格内部,首先在网格模型的平坦区域选择一点 $Q_1$ 作为种子点,然后找出距离 $Q_1$ 最近的点 $Q_2$ ,再找出与 $Q_1, Q_2$ 距离和最小的点 $Q_3$ ,则 $Q_1, Q_2, Q_3$ 就是种子三角形的三个顶点。 $Q_1$ 作为种子点要求所有邻域点的法向量与 $Q_1$ 法向量的夹角均小于 $90^\circ$ 。

### 1.2 基于点云密度的自适应邻域选择

采样后的三维点云数据如图2所示。

从图2可以看出,在细节特征丰富的地方点云分布相对密集,其它地方的点云分布相对稀疏。

由于点云密度不均匀,当网格生长范围限定不适当时,容易出现孔洞,而且会影响后续的最优点选择,导致网格出现交叠。因此,文中根据点云密度设置自适应的搜索球,以优化网格生长范围。

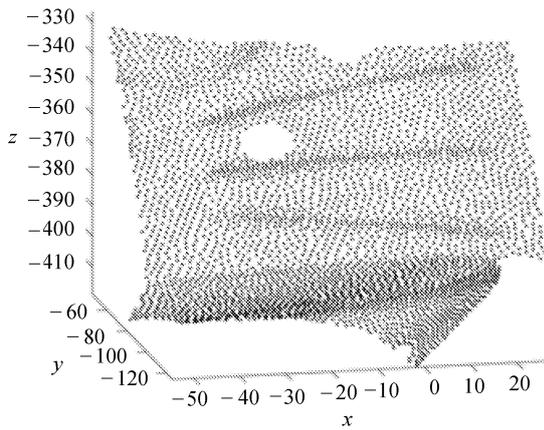


图 2 三维点云(机器猫胡须部分)

通过计算点云中各点的距离平均值来估算点云密度,点云的平均距离密度一般为

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d, \quad (2)$$

式中: $d$ ——点云中某一点与距离这点最近点的距离;

$N$ ——点云中数量。

平均距离  $E$  越大,表示点云分布越稀疏,平均距离  $E$  越小,点云分布越密集。

设  $PC$  为点云集合,  $P_i (P_i \in PC | i=1, 2, \dots, N)$  为目标点,作球心为  $P_i$ ,半径为  $r$  的空间搜索球。根据点云平均距离密度  $E$  确定空间搜索球的初始半径为

$$R_1 = S * E, \quad (3)$$

式中: $S$ ——倍数。

由目标点  $P_i$  的初始空间搜索球可以确定  $P_i$  的邻域点  $Q_j (j=1, 2, \dots, M)$ ,定义  $P_i$  的邻域平均距离为

$$\bar{d} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \| P_i - Q_j \|_2, \quad (4)$$

则空间搜索球的半径为  $r = \bar{d}$ 。

文中算法的  $r$  值仅与  $S$  相关,参数只有  $S$  一个,自动化程度较高。由于  $S$  的大小影响  $r$  的大小,如果  $S$  过小,此时模型重建不完整;如果  $S$  过大,此时程序运行时间增大。文中为了确定合适的参数  $S$ ,对点云进行多次曲面重建实验,最终根据三角形的正则度、数量以及网格孔洞数量选取曲面质量最优时的  $S$  值为 3.5。

### 1.3 投影到平面

将边界边顶点  $P_1, P_2$  的邻域  $Q_j (j=1, 2, \dots, M)$  投影到平面时,可分为两个步骤:

1)将邻域点投影到切平面。计算  $P_1, P_2$  的

中点  $P(P_x, P_y, P_z)$  的法向量  $n_1 = (n_x, n_y, n_z)$ ,由  $P$  点的坐标和法向量可以确定切平面方程为

$$n_x * (x - P_x) + n_y * (y - P_y) + n_z * (z - P_z) = 0, \quad (5)$$

由  $Q_j$  和切平面方程可以得到  $Q_j$  在切平面上的坐标  $Q'_j$ 。

2)将切平面上的点旋转到与  $xoy$  面平行的面。通过罗德里格斯旋转公式将切平面上的点  $Q'_j$  旋转到与  $xoy$  面平行的平面上,得到旋转后的坐标  $Q''_j$ ,此时  $Q''_j$  的  $z$  坐标近似相等,可只考虑点云的  $x$  和  $y$  坐标,即实现了点云从三维空间到二维平面的投影。

$$Q''_j = [\cos\theta * I + (1 - \cos\theta) * k * k^T + \sin\theta * rok] * Q'_j, \quad (6)$$

式中: $\theta$ ——局部平面法向量  $n_1$  和  $xoy$  面法向量  $n_2$  的夹角;

$k$ ——向量  $n_1$  和  $n_2$  的叉积。

$I$  是  $3 \times 3$  的单位矩阵,若

$$k = [k_x \quad k_y \quad k_z]^T,$$

则

$$rok = \begin{bmatrix} 0 & -k_z & k_y \\ k_z & 0 & -k_x \\ -k_y & k_x & 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

### 1.4 选取最优扩展点

选取最优扩展点就是在扩展边顶点的邻域中,利用约束准则选取一个最优的邻域点,与扩展边形成新的三角网格。

#### 1.4.1 平面约束准则

三角形空外接圆准则、三角形内角约束准则和小三角形准则。

#### 1.4.2 空间二面角准则

空间二面角示意图如图 3 所示。

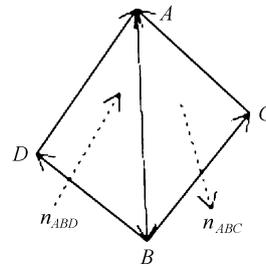


图 3 空间二面角示意图

$\triangle ABC$  是已生成三角形,  $AB$  是生长边,  $D$  是扩展点,计算  $\triangle ABC$  和  $\triangle ABD$  的夹角,即计算它们法向量  $n_{ABC}$  和  $n_{ABD}$  的夹角,夹角越接近

180°, 相邻三角形的过渡越平稳。此外, 二面角过小时, 三角形之间可能会形成交叠, 因此需要设置一个最小阈值  $\beta_{min}$ , 文中阈值  $\beta_{min}$  设置为  $\pi/3$ 。

### 1.5 修补孔洞

由于重建曲面存在部分孔洞, 为了获得完整的模型, 需要对孔洞区域进行修补。

基于最小角度法修补孔洞, 该方法主要包括识别边界、计算孔洞边界夹角和修补孔洞三个步骤。如图 4 所示。

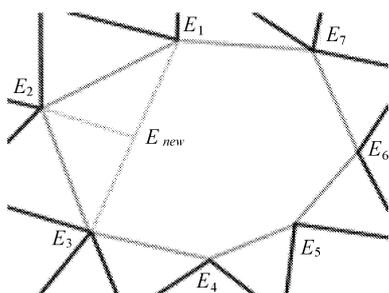


图 4 孔洞修补示意图

边界边  $E_v (v=1, 2, \dots, 7)$  首尾相接即为孔洞边界, 在计算孔洞边界夹角时, 首先利用 1.3 中的方法将孔洞边界顶点投影到平面, 得到特征多边形, 然后根据特征多边形的坐标极值点  $E_v''$  与其相邻两点  $E_{v-1}'', E_{v+1}''$  所组成边的方向向量得到

$$f = X_{E_{v-1}''E_v''} * Y_{E_v''E_{v+1}''} - X_{E_v''E_{v+1}''} * Y_{E_{v-1}''E_v''} \quad (8)$$

当  $f \geq 0$  时, 孔洞多边形是逆时针方向, 否则是顺时针方向, 进而求出夹角大小。在计算孔洞边界夹角后, 通过孔洞边界长度、边界点的距离和孔洞边界夹角计算新增点  $E_{new}$ , 并去除边长和内角不满足阈值的三角形。

## 2 实验结果与分析

1) 为验证文中算法, 以机器猫石膏像点云为实验数据, 该点云由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所自主研发的 SVision751B 型三维激光扫描仪扫描得到。

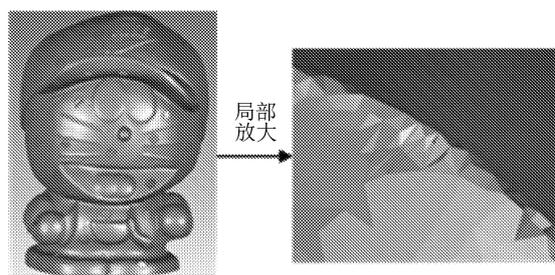
2) 为验证文中算法的有效性, 将其与传统区域生长网格化算法的结果进行对比分析。

两种方法的对比结果如图 5 所示。

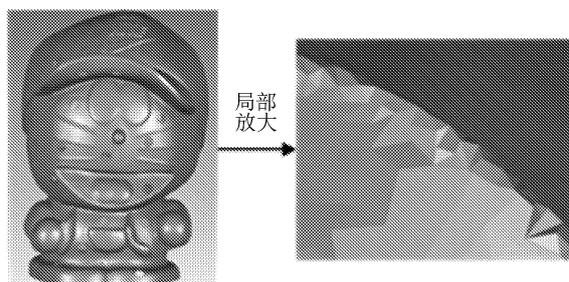
图 5(a) 是传统区域生长网格化算法结果, 存在局部区域网格错乱现象, 图 5(b) 是文中算法结果, 在图(a)的相同位置, 没有网格错乱现象, 且三角形形态良好, 能够准确地表达眼睛、鼻子等细节特征信息。

文中采用正则度对网格质量进行评价, 两种

结果的正则度直方图反映了正则度大小与三角形个数的关系, 如图 6 所示。

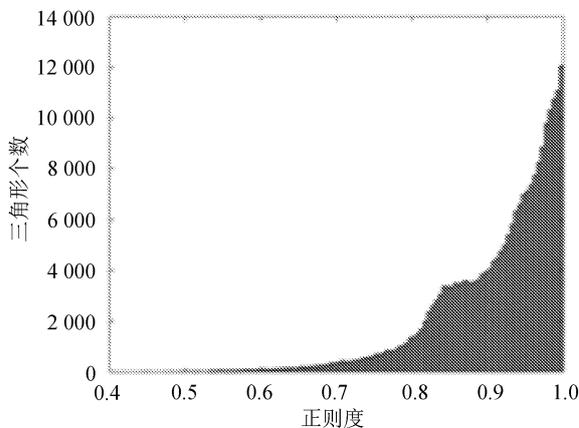


(a) 传统区域生长网格化算法

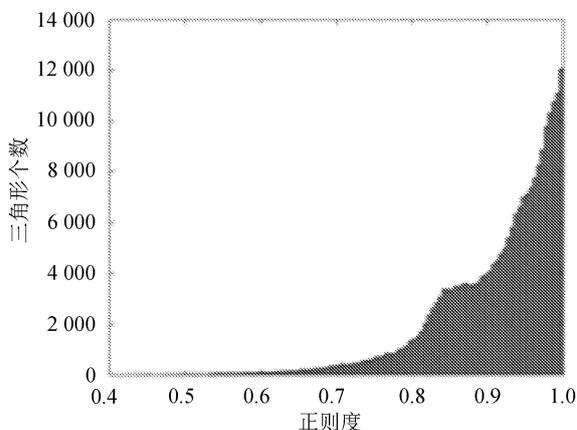


(b) 文中算法

图 5 网格化结果



(a) 传统区域生长网格化算法



(b) 文中算法

图 6 网格化结果正则度直方图

通过比较图6中的两幅图可知,两种方法的正则度大小及所占三角形数量基本相同,大多数

正则度在0.8~1.0,极少数小于0.5,狭长三角形数量不多。网格化结果数据见表1。

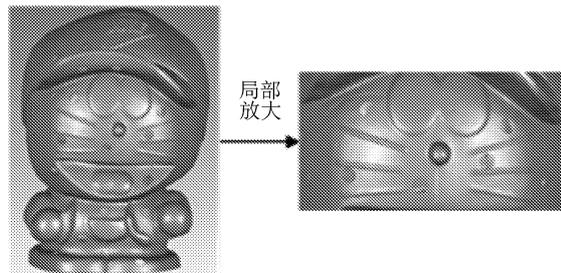
表1 网格化结果数据

网格化方法	点云数量	三角形个数	网格顶点个数	孔洞数量
传统区域生长网格化算法	114 119	225 323	114 082	418
文中算法	114 119	225 804	114 108	348

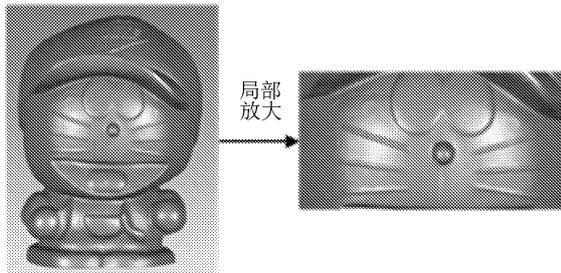
由表1可知,与传统区域生长网格化算法相比,文中算法更大程度地利用了点云数据,同时三角形个数增加0.2135%,相应的孔洞数量减少20.1149%。

综上,文中算法略优于传统区域生长网格化算法。

孔洞修补效果如图7所示。



(a) 孔洞修补前



(b) 孔洞修补后

图7 孔洞修补效果

图7(a)是孔洞修补前的网格曲面,含有若干由于模型表面粘贴标识点而形成的孔洞,图(b)是孔洞修补后结果,网格孔洞基本修补完成。

孔洞修补结果数据见表2。

表2 孔洞修补结果数据

修补前后	网格顶点个数	三角形个数
修补前	114 108	225 804
修补后	117 074	233 824

结合表2可知,修补过程中三角形数目增加3.5513%,网格顶点个数增加2.5993%,且修补前点云平均密度为1.4426,修补后孔洞区域网格顶点平均密度为1.4783,网格密度接近周围网格。修补孔洞产生的三角形的正则度分布情况如图8所示。

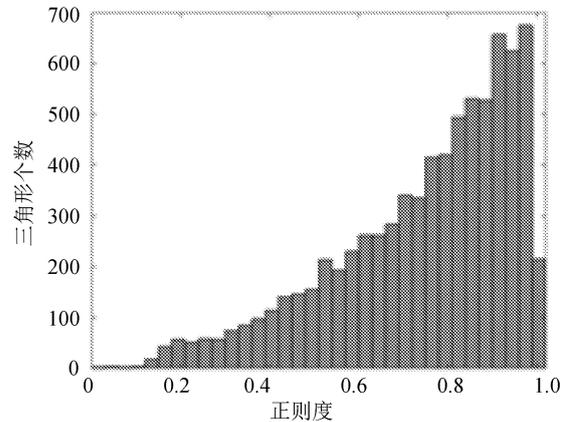


图8 孔洞修补网格正则度直方图

由图8可知,正则度在0.8~1.0的占比49.8395%,0.5~1.0的占比86.4167%,狭长三角形较少。

### 3 结 语

针对密度非均匀点云重建时难以控制网格生长范围问题,文中对基于自适应邻域的非均匀点云数据封装方法进行了研究,在保证正则度和三角形数量的前提下,减少了狭长三角形和网格孔洞的数量,有效解决了局部网格错乱问题。实验结果表明,文中算法可以有效、准确地构建出质量较好的三角网格模型,具有一定的实用性。

### 参考文献:

- [1] 张子健,程效军,曹宇杰,等.结合激光与视觉点云的古遗迹三维重建应用[J].中国激光,2020,47(11):273-282.
- [2] Qie Y F, Bickel S, Wartzack S, et al. A function-o-

- oriented surface reconstruction framework for reverse engineering[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2021, 70(1):135-138.
- [3] 林晓梅,裴建国,牛刚,等.医学图像三维重建方法的研究与实现[J].*长春工业大学学报:自然科学版*, 2005, 26(3):225-228.
- [4] 胡燕威,王建军,范媛媛,等.基于激光雷达的空间物体三维建模与体积计算[J].*中国激光*, 2020, 47(5): 0510001.
- [5] 李凤霞,刘咏梅,王晓哲,等.一种基于映射法的散乱点云 Delaunay 三角剖分算法[J].*计算机应用研究*, 2015, 32(3):950-953.
- [6] 高福顺,张鼎林,梁学章.由点云数据生成三角网格曲面的区域增长算法[J].*吉林大学学报:理学版*, 2008, 46(3):413-417.
- [7] 陈士杰,张森林,刘妹琴,等.基于改进 Delaunay 三角剖分的水下地形三维重建算法[J].*计算机科学*, 2020, 47(11):137-141.
- [8] 李晶晶,范大昭,耿弘毅,等.城市点云的区域生长三角网构建方法[J].*测绘科学技术学报*, 2016, 33(1): 65-70.
- [9] 邱春丽,许宏丽.一种散乱点云空间直接剖分算法[J].*计算机科学*, 2014, 41(2):157-160,173.
- [10] Bernardini F, Mittleman J, Rushmeier H, et al. The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1999, 5(4):349-359.
- [11] 付永健,李宗春,何华.点云内在属性因子驱动的自适应滚球算法[J].*武汉大学学报:信息科学版*, 2020, 45(3):353-361.
- [12] 王春香,郝林文,王耀,等.点云模型孔洞修补研究综述[J].*现代制造工程*, 2020(9):156-162.
- [13] 张丽艳,周儒荣,周来水.三角网格模型孔洞修补算法研究[J].*应用科学学报*, 2002, 20(3):221-224.
- [14] 李松,马聪聪,陆帆,等.基于多向波前法的岛屿孔洞修补[J].*中国机械工程*, 2019, 30(20):2473-2479.