

基于二次精简的散乱点云精简方法^①

叶冬荣¹, 李维诗¹, 张滋黎², 周维虎²

¹(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 合肥 230039)

²(中国科学院 光电研究院, 北京 100094)

摘要: 在逆向工程中, 点云精简是一个重要的步骤, 精简的质量直接关系到后续曲面重构的效率. 分析了常用的几种点云精简方法, 并针对现有方法的不足, 提出一种改进的方法. 该方法使用 PCA 主成分分析法, 利用点的 k 邻域点集拟合切平面, 将点到该平面距离作为判断特征点的依据进行初始精简, 再利用均匀网格的方法对初始精简后的点云进行重采样处理, 保留部分关键特征点. 通过初始精简和后期精简两步法完成对点云的精简步骤, 并通过实验验证了该方法的有效性.

关键词: 逆向工程; 点云精简; k 邻域; PCA 方法; 均匀网格法

Method of Scattered Point Cloud Reduction Based on Quadratic Reduction

YE Dong-Rong¹, LI Wei-Shi¹, ZHANG Zi-Li², ZHOU Wei-Hu²

¹(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

²(Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Point cloud reduction is an important step of reverse engineering. The quality of reduction is directly related to the efficiency of subsequent surface reconstruction. This paper analysed several commonly used methods of point cloud reduction and proposed an improved method against the lacks of existing methods. This method uses the PCA principal component analysis to fit tangent plane with K-Nearest Neighbour points. It calculates the distance between the point and the plane as the basis for initial reduction. Then it uses uniform grid for resampling process to retain some feature points. Through initial reduction and quadratic reduction to finish point cloud reduction. At last, it validates the effectiveness of the method with experiments.

Key word: reverse engineering; point cloud reduction; K-nearest neighbours; PCA method; uniform grid

1 引言

随着测量技术的发展, 逆向工程在工业生产中得到了广泛的应用. 在逆向工程数据处理过程中, 用于拟合曲面的点云数据通常是散乱无序的并且非常密集, 包含了很多无用信息, 这很大程度上增加了计算机处理的时间复杂度和空间复杂度^[1]. 不仅如此, 过于密集的点云数据还会影响重构得到的曲面的光顺性. 因此, 对点云的精简是逆向工程数据预处理中的一个重要的步骤.

国内外对点云精简的方法进行了大量的研究: Matin^[2]提出了一种基于中值滤波原理的均匀方格法, 将点云数据划分到各个均匀方格中, 利用位于中心的

点代替网格中的所有点. 这种方法对于分布均匀的点云可以取得较好的效果, 但对点云模型的特征不太敏感, 会使精简后的点云丢失部分重要特征. Chen^[3]提出了一种通过减少三角网格进行精简的方法, 这种方法目前被广泛的使用, 但该方法需要对点云数据首先进行三角网格化处理, 因此不适合用来对散乱点云进行处理. 孙肖霞^[4]等提出了一种基于曲率的精简方法, 该方法通过拟合最小二乘球来估算曲率. 但是算法较为复杂, 而且精简后的点云会在曲率较小处出现空白.

针对现有算法存在的不足, 本文提出了一种改进的散乱点云精简方法. 该方法即能保留原始点云的特征点, 又能避免空白区域的产生, 且算法原理简单.

^① 收稿时间:2013-12-31;收到修改稿时间:2014-02-19

分为以下两步进行:

1) 利用点到其邻域拟合平面的距离作为阈值, 对点云进行初始精简, 保留符合条件的点.

2) 对初次精简中被剔除的点进行重采样, 划分栅格, 保留距离栅格中心距离最近的点, 加入到第一步保留的点中, 得到精简后最终的点云.

2 改进的点云精简方法

2.1 初始精简

在工业测量中得到的实物点云通常是由一些复杂的曲面所构成. 这些曲面的边界、棱边、坑孔等曲率较大的位置处的点相比其他的点而言, 往往更能反映曲面的特征, 因此, 这些点被称为特征点. 为了能使精简后的点云保持原始点云的特征, 就要尽量多的保留特征点, 即在点云曲率较大处保留较多的点. 因此, 可以计算出点云在某点处的曲率, 并以该值大小作为精简该点的依据.

对曲面上点的曲率估算方法有很多, 常用的包括抛物面拟合法^[5]、圆拟合法、Gauss-Bonnet 法等. 然而, 以上方法共有的缺点是算法较为复杂, 本文中使用了一种较为简洁的估算方法: PCA(Principal Component Analysis)方法, 将点的 K 邻域点集拟合平面, 即为此点的近似切平面, 再计算点到该切平面的距离, 并将该距离值作为精简依据.

PCA 方法, 即主元分析法, 它作为一种对数据集进行分析的方法, 可以快速找到数据集中最主要的元素. 该方法首先对由点集坐标构成的协方差矩阵求特征向量, 得出点集的三个主要变化方向. 因为平面在其法向量方向变化最小, 所以点集拟合平面的法向量即为最小特征值对应的特征向量. 之后将点集坐标的中心作为平面上的一点, 利用平面的点法式方程求出拟合平面的方程. 具体计算步骤如下:

1) 设待计算的点为 P, 利用 k-d 树寻找其 K 邻域点集 $\{P_i\}(i=0,1,2,\dots,k)$, 其中 k 的取值根据点云的分布情况以及点云密度的不同而变化, 通常情况下取 15~25. 点集 $\{P_i\}$ 的三维坐标为 (x_i, y_i, z_i) , P_i 的形心 O 的坐标为

$$O = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^k p_i$$

2) 利用 P 的 K 邻域点集 $\{P_i\}$ 的三维坐标和形心坐标构造协方差矩阵

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^k (x_i - o_x)^2 & \sum_{i=1}^k (x_i - o_x)(y_i - o_y) & \sum_{i=1}^k (x_i - o_x)(z_i - o_z) \\ \sum_{i=1}^k (x_i - o_x)(y_i - o_y) & \sum_{i=1}^k (y_i - o_y)^2 & \sum_{i=1}^k (y_i - o_y)(z_i - o_z) \\ \sum_{i=1}^k (x_i - o_x)(z_i - o_z) & \sum_{i=1}^k (z_i - o_z)(y_i - o_y) & \sum_{i=1}^k (z_i - o_z)^2 \end{pmatrix}$$

上式中的 O_x 、 O_y 、 O_z 为 P_i 的形心 O 的坐标, x_i 、 y_i 、 z_i 为 P_i 的坐标.

3) 利用 Jacobi 方法求解上式中协方差矩阵的特征值和特征向量, 找出最小特征值对应的特征向量为 $q = [q_0, q_1, q_2]^T$, 该向量即为 P 点的 k 邻域点集拟合成的平面的法向量.

4) 利用切平面的法向量以及邻域形心坐标可以解出所拟合切平面的方程

$$q_0(x - o_x) + q_1(y - o_y) + q_2(z - o_z) = 0$$

式中的 q_0, q_1, q_2 为特征向量 q 的三个分量, O_x 、 O_y 、 O_z 为 P_i 的形心 O 的坐标.

5) 利用点到平面距离公式求出 P 点到其切平面距离, 将该值作为精简依据. 当某点到其切平面距离大于阈值, 则将该点保留. 本文中阈值的选择采取了一种闭环反馈的方法: 首先由计算得到每个点到其切平面的距离数值集, 根据所需的精简百分比, 粗略估计一个阈值, 使用该阈值精简并看精简结果是否能满足精简百分比. 如果精简后剩下的点数不够, 则将阈值适当减小, 反之则将阈值放大.

2.2 二次精简

在初次精简中, 点云中位于较为平坦区域的大部分点都会因为曲率较小而被剔除, 这就很容易导致这些区域内不存在任何点而成为空白区域. 这些空白区域影响了整个模型的完整度, 使得在后续模型重建中, 出现模型表面特征局部丢失的情况, 严重地降低了模型重构的精度. 针对以上问题, 本文采用了基于均匀精简法^[6]的点云二次精简, 有效地解决了该问题.

均匀精简法的主要思想是将整体点云用一个大长方体包围, 然后把大长方体分割成许多边长相等的小立方体, 将点云中的每个点按其坐标分配到某个小立方体中, 最后在每个立方体中保留到立方体中心距离最近的点.

这种方法会在点云中的每个区域保留相同数量的点, 因此会导致点云在曲率较大处缺少特征点, 从而使点云丧失部分重要特征. 然而, 作为二次精简方法配合本文中的初始精简, 这种方法可以有效弥补初始精简造成的点云中存在空白区域这一问题.

具体算法流程如下:

1)将在初始精简中被剔除的点读入, 求出点数据在 X,Y,Z 方向上的最值 $x_{max}, x_{min}, y_{max}, y_{min}, z_{max}, z_{min}$

2)按照精简百分比需要确定小立方体包围盒边长 s, 将大长方体在 X,Y,Z 方向上分别分割成 m, n, l 个小立方体, 其中

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{(x_i - x_j)^2}{2\sigma^2}\right)$$

3)将点云中所有点按其三维坐标划分到不同的小立方体中,点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 所在的立方体空间位置索引为 $xIndex, yIndex, zIndex$, 则

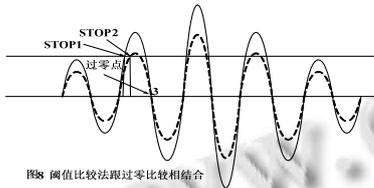


图8 阈值比较法跟过零比较相结合

4) 对每一个小立方体, 求出其内部所有点到其中心的空间距离并进行排序, 取距离中心最近的点并保留, 其余的点将被作为精简点. 其中索引位置 $(xIndex, yIndex, zIndex)$ 的立方体方格的中心位置 (x, y, z) 的计算公式为:

$$\begin{aligned} x &= x_{min} + (0.5 + xIndex) * s \\ y &= y_{min} + (0.5 + yIndex) * s \\ z &= z_{min} + (0.5 + zIndex) * s \end{aligned}$$

2.3 总体精简流程

综合上述两步, 得到总的精简流程如下所示:

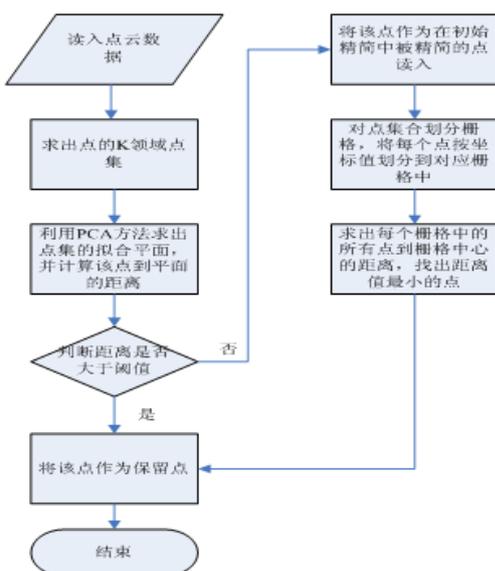


图1 本文中的精简方法流程图

3 实验结果

本实验通过比较在相同的精简百分比下, 三种不同精简方法得到的结果, 验证了本文中方法的有效性.

图 2 中为人手的点云模型, 其中(a)为包含 50000 点的原始点云. (b)图,(c)图,(d)图为经过三种不同的精简方法处理后的点云, 其中点数量都是 21000.

图 2(b)为仅使用本文中初始精简方法处理得到的点云,其中 k 的取值为 20, 图 2(c)为仅使用本文中基于包围盒的二次精简方法处理得到的点云, 其中立方体网格边长 $s=1.5$. 图 2(d)为本文中所采用的将两种方法综合使用的精简方法处理得到的点云, 其中 $k=20$, 立方体网格边长 $s=2.0$.

在仿真时间上, 图 2(b)中精简方法所需运算时间在 20s 左右, 图 2(c)中方法所需时间在 15s 左右, 而图 2(d)中方法仅需要 12s 左右.

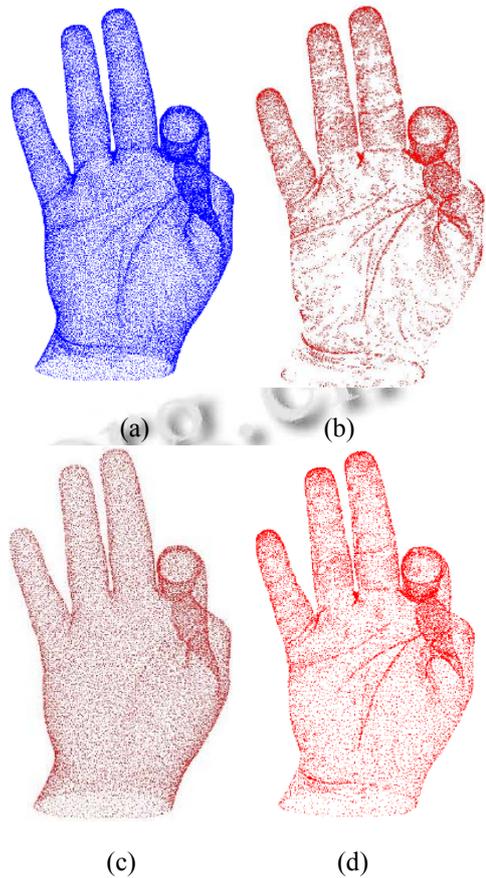


图2 人手模型精简结果

图 3 中为人脸的点云模型, (a)为包含 389000 点的原始点云. (b)图, (c)图, (d)图为经过三种不同的精简方法处理后的点云, 其中点数量都是 57500.

图 3(b)为仅使用本文中初始精简方法处理得到的点云,其中 k 的取值为 20, 图 3(c)为仅使用本文中基于包围盒的二次精简方法处理得到的点云, 立方体栅格边长 $s=1.8$. 图 3(d)为本文中所采用的将两种方法综合使用的精简方法处理得到的点云, 其中 $k=20$, 立方体栅格边长 $s=2.2$.

在仿真时间上, 图 3(b)中精简方法所需运算时间在 150s 左右, 图 3(c)中方法所需时间在 120s 左右, 而图 3(d)中方法仅需要 95s 左右.

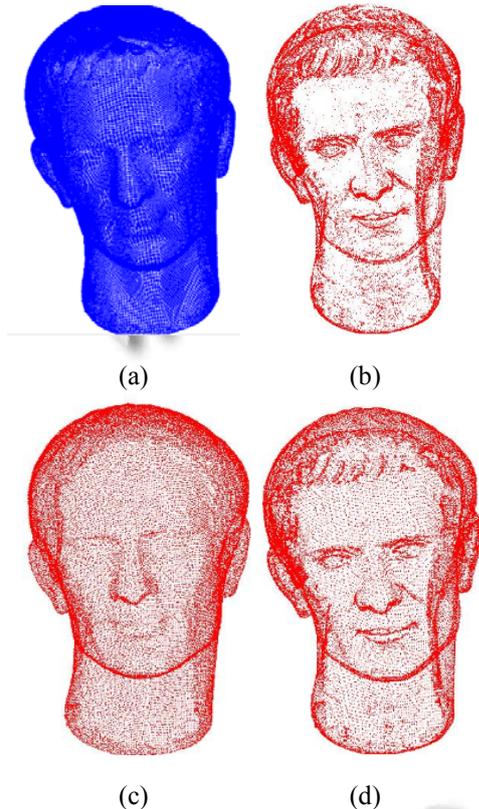


图 3 人脸模型精简结果

由上述实验结果分析可以看出: 本文中的算法, 与特征点保留算法相比较, 消除了空白区域, 与基于包围盒的均匀精简方法相比较, 保留了特征点. 作为一种博采众长的方法, 该方法可以有效的精简点云.

4 结论

点云精简是点云预处理中重要的一个环节. 本文中的算法, 利用点到其邻域拟合平面的距离作为判断特征点的依据, 对点云进行初次精简, 保留了特征点. 并且, 针对该方法的不足: 即在平坦区域留下空白的情况, 进行了二次精简, 从初次精简被精简掉的点中, 利用均匀采样保留部分点. 最后得到的点云数据即保留了特征点, 又避免了空白区域的产生. 该方法原理清晰, 计算简单, 数据处理速度快, 在对实际测量得到的散乱点云进行处理时, 获得了非常好的精简效果, 是一种较为实用的精简方法.

参考文献

- 1 Tamas V, Martin RR, Jordan C. Reverse engineering of geometric models-an introduction. CAD, 1997, 29(4): 255-268.
- 2 Martin RR, Stroud IA, Mashall AD. Data reduction for reverse engineering. RECCAD, Deliverable Document 1 Coperunicus project, no. 1068, Computer and automation Institute of Hungarian Academy of Science. January 1996. 63-69.
- 3 Chen YH, Neg CT, Wang YZ. Data reduction in integrated reverse engineering and rapid prototyping. International Journal of Computer Intergrated Manufacturing, 1999, 12(2): 97-103.
- 4 孙肖霞,孙殿柱,李延瑞,范志先.反求工程中测量数据的精简算法.机械设计与制造,2006,(8).
- 5 周绿,林亨,周约先.曲面重构中测量点云精简方法的研究.中国制造业信息化,2004,33(5):102-104.
- 6 张丽艳,周儒荣,蔡炜斌.海量测量数据简化技术研究.计算机辅助设计与图形学学报,2001,13(11):1019-1023.