

# 一种点云数据噪声点的随机滤波处理方法

董明晓

郑康平

(山东建筑工程学院, 济南 250014) (西安交通大学, 西安 710049)

**摘要** 目前逆向工程中广泛采用激光扫描法来获取数据, 测量过程中不可避免地混有不合理的噪声点, 导致重构的曲线、曲面不光滑, 因此, 需要去除数据中的噪声点。对激光线扫描法获取数据的噪声点处理方法进行了研究。噪声点处理方法与点云数据的排列形式有关, 通过对点云数据噪声数学模型的分析, 认为激光线扫描法获取数据时, 噪声点的产生主要是由随机误差引起的, 其特点是幅值大, 在光刀扫描线上引起较大的尖峰, 据此提出一种简单、快速、实用的降噪方法——随机滤波法。该方法通过比较连续点之间的相对位置, 给定一个阈值, 将其中位置起伏较大的点判定为噪声点并予以去除。通过实例验证该方法能满足曲线、曲面重构的要求。

**关键词** 曲面重构 点云数据 数据预处理 噪声误差

中图分类号: TP391.72 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)02-0245-04

## A Random Filter Algorithm for Reducing Noise Error of Point Cloud Data

DONG Ming-xiao<sup>1)</sup>, ZHENG Kang-ping<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(Shandong institute of architecture and engineering, Jinan 250014)

<sup>2)</sup>(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

**Abstract** Measured data are obtained through a laser scanner in reverse engineering. The real data inevitably contain unreasonably noise error during measuring. The noise error causes the reconstructed curve and surface rough. Therefore it is essential to remove the noise error. This paper investigates the method on reducing noise error of the measured data obtained through laser line scanning. The method on reducing noise error is closely related to the organization of the point cloud data. This paper analyzes the mathematical model about the point cloud data error. The noise error is mainly caused by random error. The characteristic of noise error is that the swing value is bigger and the peak arises on the scanning line. According to this feature, a method named the random filter algorithm is put forward for reducing noise error, and it is simple, quick and practical. The procedure of this algorithm is first to compare the relative position among the successive points. Then the points that their positions oscillate bigger are judged noise error according to a threshold and will be removed. The principle and the step are described in detail, and it is proved by some examples that the processing result of the method is effective and can meet the requirements of curve and surface reconstruction.

**Keywords** surface reconstruction, point cloud data, data preprocessing, noise error

## 1 引言

随着计算机、激光测量技术的发展, 基于激光光源的非接触式测量在工业上逐步被广泛采用, 尤其是在逆向工程中, 逐步采用了激光法来获取数据<sup>[1,2]</sup>。从测量学观点看, 非接触式测量可真正实现“零接触力测量”, 这样有效避免了高精度测量中测

量力带来的系统误差和随机误差, 且可方便实现对软质和超薄形物体表面形状的测量, 另外, 其还具有测量速度快、效率高等特点。但对于获取的数据进行CAD反求建模时, 由于多方面原因, 譬如被测对象表面的粗糙度、波纹以及其他一些表面缺陷等, 还有测量系统本身产生的影响, 如激光散斑、CCD的非线性误差、分辨率和采样误差、系统的电噪声、热噪声等, 在数据采集过程中, 不可避免地在真实数据点

中混有不合理的噪声点<sup>[2]</sup>,其结果将导致重构的曲线、曲面不光滑。因此,对于获取的数据必须处理噪声点。

## 2 噪声点的数学模型分析

如前所述,采用激光扫描光刀法获取的重构曲面对象的数据,不可避免地会含有噪声点。产生噪声点的因素是多方面的,主要可分为两类<sup>[3]</sup>:一类是被测对象表面因素产生的误差,譬如表面粗糙度、波纹等缺陷;另一类是由测量系统本身引起的误差,譬如测量设备的精度、CCD摄像机的分辨率、振动等等。激光测量中通常是对 CCD 摄像机捕捉到的二维图像像素进行转换处理后<sup>[4]</sup>,提取第三维信息而得到一系列被测对象的空间坐标值,可表示为点集 $\{A_i = f(x_i, y_i, z_i) | x_i, y_i, z_i \in E^3\}$ 。 $f(x_i, y_i, z_i)$ 一般由被测对象的数值  $g(x_i, y_i, z_i)$  和测量误差  $e(x_i, y_i, z_i)$  组成。其中,  $g(x_i, y_i, z_i)$  由确定性分量  $g^Q(x_i, y_i, z_i)$  和随机性分量  $g^S(x_i, y_i, z_i)$  两部分组成;测量误差  $e(x_i, y_i, z_i)$  可分为系统测量误差  $\alpha(x_i, y_i, z_i)$  和系统随机误差  $\beta(x_i, y_i, z_i)$ 。则测量点表示为

$$\begin{aligned} f(x_i, y_i, z_i) &= g(x_i, y_i, z_i) + e(x_i, y_i, z_i) \\ &= g^Q(x_i, y_i, z_i) + g^S(x_i, y_i, z_i) + \\ &\quad \alpha(x_i, y_i, z_i) + \beta(x_i, y_i, z_i) \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $g^Q(x_i, y_i, z_i)$  表示被测曲面的理想数值;  $g^S(x_i, y_i, z_i)$  表示被测曲面由于存在表面粗糙度、波纹以及其他一些表面缺陷而产生的与曲面理想数值的偏差;  $\alpha(x_i, y_i, z_i)$  表示由测量系统本身产生的确定性误差,并且这个确定性误差具有一定的规律;  $\beta(x_i, y_i, z_i)$  表示由于激光光刀散斑、测量系统的电噪声、热噪声等因素引起的随机测量误差。

在曲面重构中,希望尽可能最大限度地消除误差因素的影响,而使  $f(x_i, y_i, z_i) \rightarrow g^Q(x_i, y_i, z_i)$ 。式(1)中,  $g^S(x_i, y_i, z_i)$  和  $\beta(x_i, y_i, z_i)$  可看成是随机函数,一般具有较宽的频带和较高的频率,反映为测量数据中的毛刺,这种随机误差可以用平滑滤波等方法部分消除,而与曲面变化频率相差不大的随机分量却较难消除。对于  $\alpha(x_i, y_i, z_i)$  的消除,通常是采用标定的方法将其基本消除<sup>[5]</sup>。

## 3 噪声点处理方法

前面分析了测量数据噪声产生的原因,并建立

数据的数学模型。对于由  $g^S(x_i, y_i, z_i)$  和  $\beta(x_i, y_i, z_i)$  随机误差产生的噪声点的处理方法,国内外许多学者对此都进行了大量的研究工作,并提出了许多有效的方法。在逆向工程中,最简单的噪声处理方法是人机交互方法,其通过图形显示来判别明显坏点,并在数据序列中将这些点删除。很明显,这种方法在大数据量的情况下是不适宜的。

噪声点处理方法与最终获取的“点云”数据的排列形式是密切相关的。一般“点云”数据的排列形式大致可分为阵列数据,数据具有行 $\times$ 列的特点;按光刀扫描线组织的数据,数据点基本上位于同一等截面线上,可认为是部分散乱数据;完全散乱的、无组织数据三类。对于第1类和第2类数据噪声点的处理,可按扫描线逐行采用平滑滤波的方法进行处理,对于第3类噪声点的处理就不适宜直接采用平滑滤波的方法,因为点与点之间的拓扑关系并没有建立。目前,对于完全散乱数据点的噪声处理,还没有一个快速、简洁的方法。文献[6]介绍了一种利用复合二次插值函数实现对散乱“点云”数据平滑的方法。下面重点讨论对于激光扫描光刀法采集的数据噪声点的处理方法。

激光扫描光刀法采集的数据,其数据形式是按光刀扫描线组织的“点云”数据。因此,可按扫描线逐行处理。对于这种数据,噪声点处理一般都是借鉴了数字图像处理中的概念,将所获得的数据点视为 image data,即将数据点的  $z$  值作为图像中像素点的灰度值来对待。常用的方法有空间域方法如邻域平均法、中值滤波法,多次测量平均法和频率域方法如低通滤波法。其中,均值滤波算法简单,对高斯噪声有较好的平滑能力,实际应用较广。但由于:(1)在曲面的边缘区域各点  $z$  向差值较大,采用相同权值的均值滤波会造成边缘的失真;(2)在均值运算中,各个点的权值都一样,当滤波区间中存在奇异点(脉冲噪声)时,奇异点在很大程度上影响滤波效果,且因奇异点的存在,经均值滤波其影响还会扩散到其周围点,故均值滤波对脉冲噪声十分敏感;(3)均值滤波没有充分利用测点间的相关性和测点的位置信息。

文献[7]提供了一个与上述方法有所不同的策略,其基本思路是,将扫描线上的测量数据点看作是二维平面上的点,把数据点代入到一个隐式方程或显示方程  $y=f(x)$  中,这个方程必须满足曲率连续的条件,按照给定的精度误差要求,滤掉一部分噪声点,同时在分析曲率变化的基础上,对数据点进行区

域分割,而后将各区域的数据点分别代入隐式方程或显示方程  $y=f(x)$  中,再进行过滤,这样经过两次处理,即认为数据点是平滑的,可进行曲线、曲面的重构处理。这种方法原理上比较简单、实用,但也存在一些不足,数据结果处理的好坏,直接与选择的隐式方程或显示方程  $y=f(x)$  有关,而如何选择适合的方程,文献中没有进行描述,因此,这种方法有一定的局限性。

由  $g^S(x_i, y_i, z_i)$  和  $\beta(x_i, y_i, z_i)$  随机误差产生的噪声点,有以下一些特点:一是在测量数据中会出现一些强干扰信号,表现为幅值大,在光刀扫描线上引起大的尖峰,同时频率高,往往只占扫描线上的极小一段;二是除强干扰信号外,测量数据中还有一些与被测表面变化接近的低频随机信号,幅值较小,重构出的曲线、曲面会出现毛刺。这种低频随机信号,采用一般的滤波方法很难完全滤除。图 1 为一个未处理噪声点的测量数据重构的曲线及各点的曲率值。

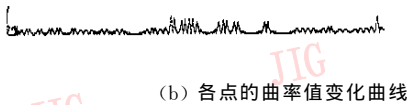
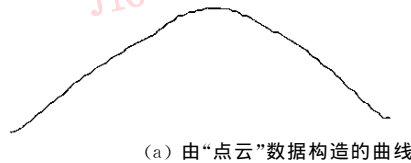


图 1 未处理“点云”数据曲线拟合

针对上述特点,下面提出一种简单、快速、实用的噪声点处理方法。其作用原理如图 2 所示,图 2(a)表示无噪声连续点相对位置,点  $P_i, P_{i+1}, P_{i+2}$  之间的相对位置没有较大起伏。图 2(b)中点  $P_{i+1}$  相对于点  $P_i, P_{i+2}$  的位置有较大起伏,如果点  $P_i$  到点  $P_{i+1}$  的距离大于或接近于点  $P_i$  到点  $P_{i+2}$  的距离,即  $\|P_{i+1}-P_i\| \geq \|P_{i+2}-P_i\|$ ,则认为点  $P_{i+1}$  是较为明显的噪声点,应予以去除。由于处理对象是随机误差产生的噪声点,因此称该方法为随机滤波法。随机滤波法的基本思想是:设测量的“点云”数据为点集  $\{P_{i,j} | i=0, 1, \dots, n; j=0, 1, \dots, m\}$ ,  $i$  表示扫描线上

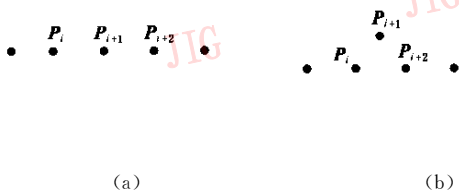


图 2 噪声点示意图

的点数,  $j$  表示光刀扫描线数。对于第  $j$  条扫描线上的数据点,设第  $i$  个点与第  $i+1$  个点的距离为  $d_1$ ,第  $i+1$  个点与第  $i+2$  个点的距离为  $d_2$ ,第  $i$  个点与第  $i+2$  个点的距离为  $d_3$ (图 3)。则有

$$d_1 = \|P_{i+1,j} - P_{i,j}\|$$

$$d_2 = \|P_{i+2,j} - P_{i+1,j}\|$$

$$d_3 = \|P_{i+2,j} - P_{i,j}\|$$

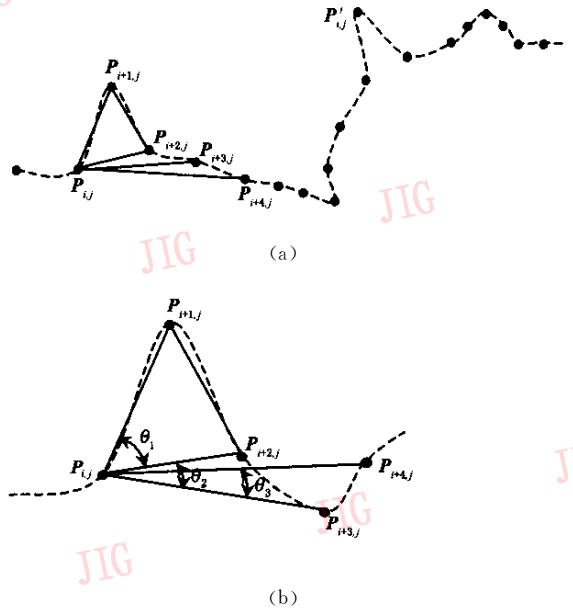


图 3 点的分布示意图

设  $\Delta = d_3 - d_1$ ;  $\delta = \|d_2 - d_1\|$ ; 给定阈值  $\epsilon_1, \epsilon_2$ ;  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  均为有向角,规定逆时针方向为正,顺时针方向为负,具体表示如图 3(b)所示。有如下判断准则:

(1) 如果  $\Delta < 0$ , 或  $0 < \Delta \leq \epsilon_1$ , 分别计算  $\theta_1, \theta_2$ , 如果  $\theta_2$  与  $\theta_1$  的旋转方向相反,则认为  $P_{i+1,j}$  点是噪声点,从点集中将该点剔除;如果  $\theta_2$  与  $\theta_1$  的旋转方向相同,再计算  $\theta_3$ ,如果  $\theta_3$  与  $\theta_1$  的旋转方向相反,则认为  $P_{i+1,j}$  点是噪声点,从点集中将该点剔除(如图 3(b)所示);如果  $\theta_3$  与  $\theta_1$  的旋转方向相同,但  $0 \leq \delta \leq \epsilon_2$ , 则认为  $P_{i+1,j}$  点是噪声点,从点集中将该点剔除(如图 3(a)所示);否则  $P_{i+1,j}$  点予以保留,并且这时可初步判定  $P_{i+1,j}$  点是区域分割特征点。这一判断准则对于强干扰信号产生的随机误差比较敏感,能有效去除较为明显的噪声点。

(2) 如果  $\epsilon_1 < \Delta$ , 但  $0 \leq \delta \leq \epsilon_2$ , 分别计算  $\theta_1, \theta_2$ , 如果  $\theta_2$  与  $\theta_1$  的旋转方向相反,则认为  $P_{i+1,j}$  点是噪声点,从点集中将该点剔除。如果  $\theta_2$  与  $\theta_1$  的旋转方向相同,再计算  $\theta_3$ ,如果  $\theta_3$  与  $\theta_1$  的旋转方向相反,则

认为  $P_{i+1,j}$  点是噪声点,从点集中剔除;如果  $\theta_3$  与  $\theta_1$  的旋转方向相同,则  $P_{i+1,j}$  点予以保留。这一判断准则可部分消除测量数据中一些与被测表面变化接近的低频随机信号产生的噪声点。

上述两个判断条件不满足的点,均予以保留。

上述判断准则算法的实现步骤如下:

(1) 对任意一条扫描线数据点,计算  $d_1, d_2, d_3$ ;

$\Delta = d_3 - d_1$ ;  $\delta = \|d_2 - d_1\|$ ; 给定阈值  $\epsilon_1, \epsilon_2$ ;

(2) 根据判断准则进行判断;

(3) 重复步骤 1 和步骤 2,直到一条扫描线上的点处理完毕;

(4) 处理所有的光刀扫描线。

按照上述原理和准则进行处理,有可能出现误判和漏判。误判的点主要是阶跃点和拐点,上述两条准则中除了考虑点与点的距离因素外,还考虑了点与点之间夹角的旋转方向,就是为了防止将阶跃点和拐点误判为噪声点。为了防止漏判,将每一条扫描线上数据点中的“坏点”去除后,重新组合数据点集,按上述步骤重复 2~3 次,便能防止漏判。另外,上述两条判断准则中的给定阈值  $\epsilon_1, \epsilon_2$  要合适,如果太小有可能出现漏判,如果太大,有可能出现误判,造成真实点损失过多。经过实验,  $\epsilon_1$  取  $1 \times 10^{-5}$ ,  $\epsilon_2$  取  $1 \times 10^{-5}$  较为合适,这样既能保证去除效果,也不会造成真实点损失过多。

图 4 所示的图形,就是按照上述步骤处理的一条扫描线的效果。与图 1 相比较,噪声点处理的效果是比较满意的。但值得注意的是,上述随机滤波算法中,对每一条扫描线的两个端点均未作处理,这一点可留在对数据点进行光滑处理时再考虑。

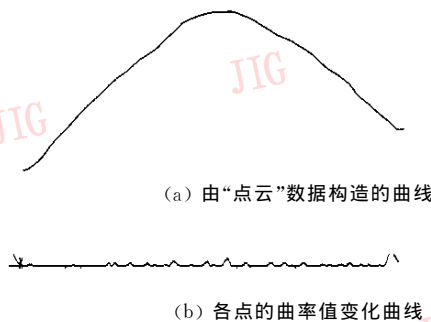


图 4 处理噪声后“点云”数据曲线拟合

面重构过程的关键技术之一。本文所提出的随机滤波降噪算法原理清晰、简洁,计算简单、速度快,具有很好的降噪效果。在讨论算法时,主要是针对激光扫描光刀法采集的数据噪声点的处理。该算法在曲面重构软件及其他 CAD/CAM 软件中使用,都取得了较为满意的效果,是一种较为实用的噪声处理方法。但仍存在一些问题需要进一步研究和完善,譬如,降噪处理后的数据精度评定。

## 参考文献

- 1 Nirant V Puntambekar, Andrei G Jablokow, H Joseph Sommer III. Unified review of 3D model generation for reverse engineering [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 1994, 7(4): 259~268.
- 2 Tamás Várady, Ralph R Martin, Jordan Cox. Reverse engineering of geometric models an introduction [J]. Computer-Aided Design, 1997, 29(4): 255~268.
- 3 周利民. 自由曲面快速反求技术与应用研究 [D]. 西安: 西安交通大学机械工程学院, 1997.
- 4 许智钦, 闫明, 张宝峰等. 逆向工程技术三维激光扫描测量 [J]. 天津大学学报, 2001, 34(3): 404~407.
- 5 杨耀权, 施仁, 于希宁等. 激光扫描三角法大型曲面测量中影响参数分析 [J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(7): 15~18.
- 6 李江雄, 柯映林. 基于特征的复杂曲面反求建模技术研究 [J]. 机械工程学报, 2000, 36(5): 18~22.
- 7 Huang Ming-Chih, Tai Ching-Chih. The Pre-Processing of Data Points for Curve Fitting in Reverse Engineering [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000, 16(9): 635~642.



董明晓 1965 年生, 山东建筑工程学院, 副教授, 西安交通大学博士研究生。主要研究方向为 CAD 和机电一体化技术。



郑康平 1964 年生, 陆军航空兵学院, 博士, 2003 年于西安交通大学获工学博士学位。主要研究方向 CAGD/CAM。

## 4 结 论

对采用激光法获取的数据进行降噪处理, 是曲