

曲面重构中点云数据的区域分割研究

董明晓^{1),2)} 郑康平²⁾ 姚斌²⁾

¹⁾(山东建筑工程学院机电系, 济南 250014) ²⁾(西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

摘要 在曲面重构中,由于实际的曲面模型往往含有多个曲面几何特征,即由多张曲面组成,如果对使用激光法测量的“点云”数据直接进行拟合,将会造成曲面模型的数学表示和拟合算法处理的难度加大,甚至无法用较简单的数学表达式描述曲面模型,因此针对该问题,提出了一种基于数据点曲率变化的区域分割方法,即先对每一条扫描线上的数据点求出曲率值,然后将其中曲率值变化较大的点提取出来作为边界点,当边界确定后,再将云点数据分割成多个区域,由于每个区域一般具有较简单的几何特征,因此可用简单的数学模型来描述,并可重构单张曲面。该算法不仅原理简单、易于理解和编程,而且能提高曲面模型重构效率。

关键词 曲面重构 点云数据 数据分割 曲率

中图分类号: TP391.72 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2005)05-0575-04

Research on Point Cloud Data Segmentation in Surface Reconstruction

DONG Ming-xiao^{1),2)}, ZHENG Kang-ping²⁾, YAO Bin²⁾

¹⁾(Department of Mechano-Electronic Engineering Shandong Institute of Architecture and Engineering, Jinan 250014)

²⁾(School of Mechanical Engineering Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract In surface reconstruction, the actual surface model generally contains several surface geometrical features. Namely it consists of multi-surface patches. If directly fitting surface with these point cloud data obtained from a laser scanner, the surface model presentation and the surface fitting are hard to do. Even it is difficult to use a simple formula to describe the surface model. In this paper, a method for region segmentation algorithm according to the curvature variation of data points is proposed. The operational principle is to calculate the curvature values to data points on each scanning line. The points with bigger curvature variation are picked up as boundary points. After borderline are determined, point cloud data are divided into several regions. Each region has simple geometrical features, and can be described in simple mathematical model, and then a single surface is reconstruct. This algorithm is simple, and can be easily understood and programmed. Efficiency of surface model reconstruction is enhanced.

Keywords surface reconstruction, point cloud data, data segmentation, curvature

1 引言

目前逆向工程技术已广泛应用于工程领域,由于自由曲面的形状复杂,因此自由曲面重构是逆向工程研究的难点和主要内容之一。曲面重构的过程一般划分为数据获取、数据压缩、区域分割、曲面拟合及CAD(computer aided design)建模^[1,2]几个主要步骤。目前,随着激光测量技术和设备的发展,曲面重构已广泛采用激光扫描法来获得模型数据。由于

激光扫描法采集的数据往往十分密集,数据量一般都在数MByte,甚至达数十MByte,即使处理了噪声点,数据量仍然很大,这样的数据通常形象地被称为“点云”数据,而实际的曲面模型往往含有多个曲面几何特征,也即是由多张曲面组成的,因此如果利用“点云”数据直接进行拟合,则会造成曲面模型的数学表示和拟合算法处理的难度加大,甚至无法用较简单的数学表达式描述曲面模型。目前逆向工程中一般是将数据点划分成具有单一几何特征的拓扑结构区域来进行曲面重构^[1-4]。每个拓扑区域主要包

收稿日期:2003-11-20; 改回日期:2004-10-18

第一作者简介:董明晓(1965~),女,1998年获山东工业大学工学硕士学位,现为山东建筑工程学院机电工程系教授,西安交通大学博士研究生。主要研究方向为CAD/CAM、机电一体化技术。E-mail: dongmingxiao@163.com

含以下两方面信息:一是区域内数据点的几何信息,二是每个区域的拓扑信息。由于几何特征单一的拓扑区域,其在重构曲面或曲面局部修改时,能用简单的数学模型表示^[5],而且能提高曲面模型重构效率,因此,数据点区域分割是曲面重构中的关键环节之一^[2,6]。

值得注意的是,由于各种因素的影响,采用激光法获取的数据,不可避免地在真实数据点中混有不合理的噪声点,其结果将直接影响计算精度,因此在进行数据点区域分割之前,首先应进行噪声点处理和数据压缩处理。关于数据的噪声点处理和数据压缩处理,可参看文献[7,8],本文中不再展开讨论。

2 “点云”数据的区域分割方法概述

关于测量数据的区域分割方法,国内外许多学者对此都进行了研究。区域分割主要有基于面和基于边的方法^[6,9~11],其中基于面的方法是根据微分几何中曲面的某些特征参数(如高斯曲率)的性质来确定属于一个面的所有数据点,而上述特征参数的求取则是在曲面光滑连续的情况下才有效。由于真实物体表面不可能是完全光滑连续,而只可能是分片连续的,所以如何准确地估算出分片连续曲面的曲率是基于面分割方法的瓶颈;基于边的方法是首先根据点的局部几何特性在点的集合中检测到边点,然后进行边点的连接、拟合。自由曲面零件采用激光扫描光刀法进行测量时,通常是将被测曲面按照曲面→数字化曲线→测点的次序进行分解,由于按光刀扫描线组织的数据,其数据点基本上位于同一等截面线上,所以基于边的曲面分片方法更适合于这类“点云”数据的区域分割。

区域分割的主要目的是为了检测出数据点中某一指标值(例如 Z 坐标值或曲率值)变化较大的点,因为这些点可按指定要求组成某一区域的边界,这样边界确定后,也就将“点云”数据分割成了多个区域,由于每个区域一般具有单一的几何特征,因此可用较为简单的数学方程来建立模型,并可重构出单张曲面。

3 “点云”数据的区域分割算法研究

一条曲线上的边界点可分为阶跃边界(高度不连续)、褶皱边界(方向不连续)和光滑边界(曲率不连续),如图 1 所示。下面对其识取方法进行研究。

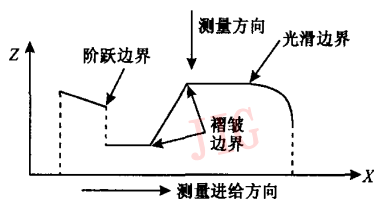


图 1 数字化曲线上边界点的分类

Fig. 1 The classs of boundary points on the digital curve

(1) 高度不连续的识取

对于数字化曲线上的任一测点 $P(i, j)$, 其阶跃幅值 M_{jump} 可通过求取该点和其相邻两点 $P(i, j-1)$ 和 $P(i, j+1)$ 在 Z 向的高度差的最大值来获得, 具体有

$$M_{\text{jump}}(i, j) = \max \{ |z(i, j) - z(i, j+1)|, |z(i, j) - z(i, j-1)| \} \quad (1)$$

当该幅值 M_{jump} 大于指定的阈值 T_s (下角 S 表示指定的系统) 时, 则将该点记为阶跃边界点。由于阶跃边界点的特征比较明显, 因此比较容易识取。

(2) 褶皱边界(方向不连续)和光滑边界(曲率不连续)的识取

对于这两类边界点的识取, 难度相对较大一些。文献[9, 11]介绍了一些较好的边界识取方法。

由于激光光刀扫描法所采集的数据, 一般具有数据点按扫描线组织的特点, 因此, 本文对于扫描线数据边界的识取, 在文献[9]的基础上, 提出一种基于数据点曲率变化的区域分割方法。该方法的原理是: 一般平面上的 3 个点可以构成一个圆, 而且其圆心坐标可通过 3 个点的坐标求得(如图 2 所示)。

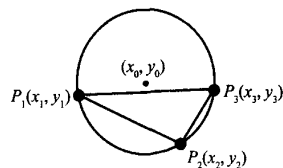


图 2 平面上的 3 点与圆心

Fig. 2 Three points & the centre of a circle on the plane

$$x_0 = \frac{a - b + c}{m} \quad (2)$$

$$y_0 = \frac{e - f + g}{m} \quad (3)$$

其中,

$$a = (x_1 + x_3)(x_1 - x_2)(y_2 - y_1)$$

$$b = (x_1 + x_2)(x_1 - x_2)(y_3 - y_1)$$

$$c = (y_3 - y_2)(y_3 - y_1)(y_1 - y_2)$$

$$\begin{aligned}
 e &= (x_3 - x_2)(x_2 - x_1)(x_3 - x_1) \\
 f &= (y_2 + y_1)(y_2 - y_1)(x_3 - x_1) \\
 g &= (y_3 + y_1)(y_3 - y_1)(x_2 - x_1) \\
 m &= 2[(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)] \\
 \text{则 } P_2 \text{ 点的曲率值可定义为} \\
 k &= \frac{1}{r} = \frac{1}{\sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2}} \quad (4)
 \end{aligned}$$

依据上述原理进行边界识取时,可先对数据点按扫描线进行一次光顺处理,再根据式(2)、式(3)及式(4)来对一条扫描线上的数据点顺序取3个点 $P_{i,j}, P_{i,j+1}, P_{i,j+2}$ (i 表示光刀扫描线数; j 表示扫描线上的点数),即可求得 $P_{i,j+1}$ 点的曲率;同时遍历这条线上的所有点,即可求出这条扫描线上所有点的曲率值(除两个端点外);接着根据曲率值的变化趋势求曲率的算术平均值,并将曲率平均值定为判断阈值 K_c (c 表示本次计算),这样当点 $P_{i,j+1}$ 的曲率值 $k_i > K_c$ 时,即可将 $P_{i,j+1}$ 点识取出来,并将该点的坐标、曲率值、序号一并记录到所定义的数组 A 中保存,如此对所有的点进行判断(保证每一条扫描线的两个端点不能丢失),然后对数组 A 中的 $P_{i,j}, P_{i,j+1}$

连线与 $P_{i,j+1}, P_{i,j+2}$ 连线之间的夹角 $\theta_{i,j+1}$ 进行计算,并将 $P_{i,j+1}$ 与 $\theta_{i,j+1}$ 保存到所定义的数组 B 中,以备后用,如此遍历这条线上的所有点,即可计算出所有点对应的夹角(除两个端点外);而后再对数组 B 中记录的夹角值进行绝对值大小比较,其中前两个较大的绝对值所对应的点可认为是边界点,可将其记录到数组 C 中,同时将两个端点也一并记录到数组 C 中。这样对每条光刀线的点都如此进行判断,就组成了一个边界点的点集,这里有两点需要注意:①每一条线的搜索起点都在同一方向,而且每条线上的数据点编号都从0开始;②将边界点存储到边界点集中时,都是按点所在的线号、编号、曲率值顺序进行存储;最后将边界点集中每条线上曲率值接近、且点的编号相近的数据点顺序连接,即得到分割区域的边界线。图3是上述算法的实例验证,图3(a)是鼠标测量数据中的一条扫描线,图3(b)是这条扫描线上所有点的曲率值图,图3(c)是当 $K_c = 1.832117$ 时所识取的特征点,图3(d)是最终边界点,其原始数据点为143个,识取特征点时间是0.00534s,识取边界点的时间是0.00456s。

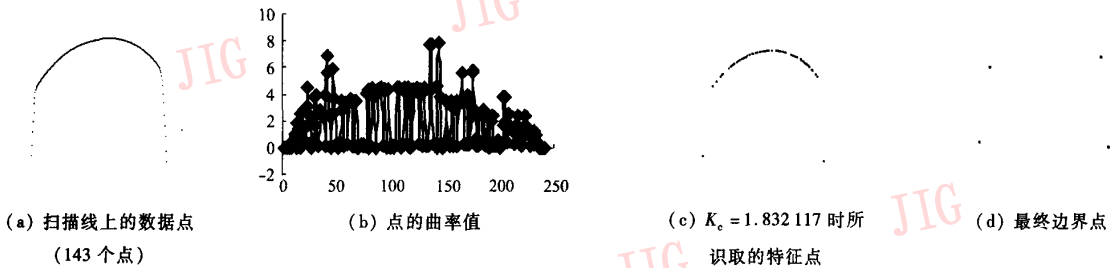


图3 光刀扫描线数据边界的识取
Fig. 3 Identifying the boundary points on a scanning line

总结上述算法的步骤如下:

- (1) 对每条扫描线的数据点,先进行一次光顺处理;
- (2) 对一条扫描线,计算所有点的曲率(除两个端点外),并计算平均曲率值作为阈值 K_c ;
- (3) 对扫描线上的每一点进行判断,如果点 $P_{i,j}$ 的曲率值 $k_i > K_c$ 时,则将 $P_{i,j}$ 点提取出来,并将该点的点坐标、曲率值、序号一并记录到所定义的数组 A 中保存;
- (4) 对数组 A 中 $P_{i,j}, P_{i,j+1}$ 连线与 $P_{i,j+1}, P_{i,j+2}$ 连线之间的夹角 $\theta_{i,j+1}$ 进行计算,并将 $P_{i,j+1}$ 与 $\theta_{i,j+1}$ 保存到所定义的数组 B 中;
- (5) 比较数组 B 中记录的夹角值的绝对值大

小,将其中两个较大的绝对值所对应的点作为边界点识取出来,记录到数组 C 中,同时,将两个端点也一并记录到数组 C 中;

- (6) 重复步骤1~步骤5,遍历所有扫描线,即完成边界点的识取。

图4(a)是一鼠标的测量数据,图4(b)是所识取的轮廓点,图5是最终的边界点和边界轮廓线。该鼠标扫描线数为109条,数据点总计35456个,识取特征点时间是0.7894s,识取边界点的时间是0.3672s。

从上面两个例子可看出,边界点识取效果的好坏,与阈值 K_c 的选定紧密相关。由于每条扫描线上数据点曲率变化趋势不是完全相同的,因此在选定阈值 K_c 时,不应主观臆断选定一值。可行的方法



图 4 鼠标“点云”数据的边界识取

Fig. 4 Identifying the boundary points of the point cloud data on a mouse



图 5 “点云”数据的区域分割

Fig. 5 The region segmentation of the point cloud data

是:在计算完所有扫描线数据点的曲率值后,再通过程序对每条扫描线上数据点的曲率值进行分析,同时计算出每条扫描线上的平均曲率值,一般曲率较大的值,大都是由于几何形状变化较大而引起的,从图 3(b)中也可看出这一点;而后以每条扫描线的平均曲率值作为阈值 K_c ,再用计算机进行边界识取,这样就可基本保证边界轮廓能够识取出来(如图 4(b)所示)。最后对上面的结果再进行进一步判断,即可完成“点云”数据的分割。最终分区结果如图 5 所示。

上述算法较好地解决了激光光刀扫描法采集的数据的区域分割问题,但由于这种方法获取的数据往往十分密集,数据量很大,尤其当曲面面积较大、形状复杂时,“点云”数据量大量增加,会大大增加处理时间,因此在一定的精度条件下,应对测量数据进行相应的压缩处理。关于数据压缩算法,很多文献中都有介绍。一般可引用文献[7,12]所介绍的方法对数据进行压缩处理后,再用上述算法进行区域分割处理。

4 结论

对用激光光刀扫描法测量得到的数据进行分割处理,是曲面重构过程的关键环节之一。上面所述的基于数据点曲率变化区域分割方法,原理简单、方便实用、边界识取速度较快,但不足之处是要进行两

次判断。如果要实现由计算机来自动完成区域分割,一种可行方法是对每条扫描线的阈值 K_c ,采用自适应的方法确定。作者已在这方面作了一些研究,但还存在一些问题,这也是作者下一步需要进一步完善的工作之一。

参考文献 (References)

- 1 Puntambekar Nirant V, Jablolkow Andrei G, Joseph H Sommer III. Unified review of 3D model generation for reverse engineering[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 1994, 7(4):259 ~ 268.
- 2 Tamás Vtrady, Martin Ralph R, Jordan Cox. Reverse engineering of geometric models-an introduction[J]. Computer-Aided Design, 1997, 29(4): 255 ~ 268.
- 3 Kruth J P, Kerstens A. Reverse engineering modeling of free-form surfaces from point clouds subject to boundary conditions[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 76(1-3):120 ~ 127.
- 4 Werner A, Skalski K. Reverse engineering of free-form surfaces[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 76(1-3): 128 ~ 132.
- 5 Ma Wei-yin, He Pei-ren. B-spline surface local updating with unorganized points [J]. Computer-Aided Design, 1998, 30(11): 853 ~ 862.
- 6 Sarkar B, Menq C H. Smooth-surface approximation and reverse engineering[J]. Computer-Aided Design, 1991, 23(9):623 ~ 628.
- 7 Li Jian. Research on the foundation technology of free-form surface digital manufacturing based laser scanner[D]. Phd. dissertation: School of Mechanical and Energy Engineering Zhejiang University, 2001. [李剑. 基于激光测量的自由曲面数字制造基础技术研究[D]. 博士学位论文:浙江大学机械与能源工程学院, 2001.]
- 8 Zheng Kangping. Research on the key technology of surface reconstruction from point cloud data[D]. Phd. dissertation: School of Mechanical Engineering Xi'an Jiaotong University, 2003. [郑康平. 基于云点数据的曲面重构关键技术的研究[D]. 博士学位论文:西安交通大学机械工程学院, 2003.]
- 9 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.
- 10 Woo H, Kang E, Wang Sem-yung, et al. A new segmentation method for point cloud data[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(2):167 ~ 178.
- 11 Yang M, Lee E. Segmentation of measured point data using a parametric quadric surface approximation [J]. Computer-Aided Design, 1999, 31(7):449 ~ 457.
- 12 Saux E, Daniel M. Data reduction of polygonal curves using B-splines [J]. Computer-Aided Design, 1999, 31(8):507 ~ 515.