

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.06.018

截面数据精确分段方法研究

张冉, 张旭, 章海波

(上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘要:针对截面数据分段精度不够,从而导致截面曲线重构精度差的问题,提出一种截面数据精确分段方法。这里重点研究相邻特征为直线特征和自由特征在满足 G^1 连续时数据的精确分段。首先根据数据平滑的原理及其作用,对被平滑的数据分别采用不同的领域窗口方法确定出分段点所在的数据点区间;然后以自由曲线的逼近误差作为判断条件,在该区间内进一步迭代搜索精确的分段点。提出的截面数据分割方法不仅能够在现有数据中寻找分段点,而且可以超越现有数据点并在其之间寻找更精确的分段点。实例表明,该方法大大提高了截面数据的数据精度,进而使重构的截面曲线更加符合初始设计意图。

关键词:截面曲线重构;逆向工程;二维截面;数据分段;分段点

中图分类号:TP391

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)06-0070-05

Research on Accurate Segmentation Method of Sectional Data

ZHANG Ran, ZHANG Xu, ZHANG Haibo

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Due to poor segmentation accuracy of sectional data, resulting in sectional curve reconstruction poor accuracy, accurate segmentation method of sectional data was proposed. The data segmentation of linear features and freeform features in G^1 continuous was focused. Firstly, according to principle and function of data smoothing, the method of different neighborhood window was used for smoothed data to determine data points interval of segmentation point; Then the approximation error of free curve as the judgment condition, the accurate segmentation point was further iterative searched in the interval. The proposed method not only find segmentation point in existing data, but also go beyond the existing data points and find more accurate segmentation point between them. Examples show the segmentation accuracy of sectional data is greatly improved, makes the reconstructed sectional curve conform to the original design intent.

Key words: sectional curve reconstruction; reverse engineering; 2D cross-section; data segmentation; segmentation point

现代工业产品的设计通常遵循简单到复杂的基本设计原则,即由二维截面曲线通过拉伸、旋转、扫成或蒙皮等规则来生成复杂的曲面模型或实体模型。同理,在基于特征的逆向工程技术中,二维截面数据的重构同样是曲面重构的基础,其重构的精确与否、质量好坏直接关系到三维重构模型外观重现及功能复原效果的优劣。在由切片数据或扫描测量数据重构曲线时,如何精确识别和提取不同特征曲线间的分段点进行数

据分割,对二维截面曲线的重构精度和质量有重要的影响。

在实际的二维截面数据逆向建模应用中,对截面数据分割普遍的做法是根据实际离散数据的曲率分析并辅以工程师的经验,提取截面数据的数据点,得到具有单一特征的数据段,然后对每一段数据进行基于边界约束的重构^[1-2]。对于二维截面数据的重构及截面数据的分割有很多专家学者进行了研究。P. Benko^[3-4]

收稿日期:2014-04-02;修回日期:2014-06-30

基金项目:上海高校青年教师培养资助计划(shgcjs024)

作者简介:张冉(1988),男,河北邯郸人,硕士研究生,主要研究方向为逆向工程、CAD。通信作者:张旭, E-mail:zxu1116@126.com

研究了直线和圆弧两种曲线特征组成的截面曲线的重建问题,以及曲线特征间的约束关系。Tai 和 Huang^[5-6]提出基于截面数据的离散曲率计算进行数据分段,对每段数据进行带边界连续性条件的 B 样条曲线拟合来得到整体连续的截面线。B. M. Imani^[7]提出一种相对角法对截面数据进行分割,并基于边界约束利用不同阶次的 B 样条曲线进行数据重构。刘云峰^[8]对截面数据的整体优化重构问题进行研究,对于 G^1 连续时,保证了边界处相切约束,但是却放大了曲线逼近程度,并且分段点的位置精度没有很好保证。

以上对于截面数据分段的精度还存在不足。由于数据的离散型、数据的提取精度等因素影响,由曲率法提取的分段点,只能在现有数据点中选择,而实际理论分段点一般不会正好与现有某数据点重合。本文重点研究相邻特征为直线特征和自由特征在满足 G^1 连续时,提取精确的分段点进行数据分割的方法,通过确定分段点所在数据点区间,并在区间内逐步迭代搜索,最终找到能够更好反映初始设计意图的分段点。

1 离散数据近似曲率估算

对轮廓数据进行分段的方法中有一种是采用轮廓离散曲率估算法。常用的曲率估算法是三点圆拟合法^[9],假设对应于截面轮廓数据 $I = \{p_0, \dots, p_m\}$ 的曲率序列是 $K = \{K_0, \dots, K_m\}$,那么 p_i 处的离散曲率 K_i 定义为通过三个相邻数据点 p_{i-1}, p_i 和 p_{i+1} 的圆的曲率。如图 1 所示。

$$K_i = \frac{\Delta p_{i-1} p_i p_{i+1}}{4l_i l_{i+1} l'_i} \operatorname{sgn}(\Delta p_{i-1} p_i p_{i+1}) \frac{2 \sin \gamma_i}{l'_i} \quad (1)$$

其中 $i \in [1, 2, \dots, m-1]$, $l_i = |p_i - p_{i+1}|$, $l'_i = |p_{i+1} - p_{i-1}|$, $\Delta p_{i-1} p_i p_{i+1}$ 是三角形的有向面积。此种方法计算简便,但是受噪声影响较大,在实际应用中,很难根据该方法得到一个较好的分段点进行数据分割。所以需要采用一定的方法先确定分段点所在的大致位置,或者一个数据点区间范围,然后再逐步缩小该区间直到找到一个合适的更能反映初始设计意图的精确分段点。

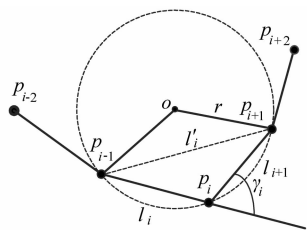


图 1 估算离散曲率

Figure 1 Estimation of discrete curvature

2 分段点区间的确定

先假设分段点所在的数据点区间为 S ,那么为了得到该区间,需要确定区间 S 的左右端点,假设左端点为 P_l 右端点为 P_r 。下面根据平滑滤波的原理及作用,通过对数据平滑的方法来得到区间 S 的左右端点。

常用的数据平滑滤波有标准高斯、平均或中值滤波等方法。虽然这些平滑滤波可以使离散数据变得更平滑,但都会存在一个缺点,就是都会弱化原始数据的形貌特征,尤其是在两相邻特征过渡的边界处,影响效果更加明显。分析平滑滤波在两相邻特征过渡的边界处弱化作用,一般的平滑滤波可以扩大边界特征的过渡区域,这样会使得原始数据的理论分段点经平滑滤波后移动,偏向受滤波作用较小的特征数据方向。这时可以利用这一特点,把经平滑后数据的数据点作为原始数据分段点区间 S 的其中一个端点。

此过程中数据平滑的对象是带有较为微小的系统误差和随机误差的数据,是由于测量系统本身存在的机械误差和测量时的震动等因素造成的,所以为了得到区间 S 的两个端点,下面采用的是指定权值的高斯滤波器,并通过改变邻域窗口来分别得到区间 S 的两个端点,滤波器窗口大小采用 3 个数据点。设原数据 $I = \{p_0, \dots, p_m\}$,经滤波后产生的新数据为 $I' = \{p'_0, \dots, p'_m\}$,确定左端点 P_l 的滤波算法为

$$\begin{cases} p'_i = \frac{1}{7}(4p_i + 2p_{i+1} + p_{i+2}), i = 0, \dots, m-2 \\ p'_m = p_m \\ p'_{m-1} = \frac{1}{4}(p_{m-2} + 2p_{m-1} + p_m) \end{cases} \quad (2)$$

确定右端点 P_r 的滤波算法为

$$\begin{cases} p'_i = \frac{1}{7}(4p_i + 2p_{i-1} + p_{i-2}), i = 2, \dots, m \\ p'_0 = p_0 \\ p'_0 = \frac{1}{4}(p_2 + 2p_1 + p_0) \end{cases} \quad (3)$$

图 2 所示为对数据经过上述的两种不同的邻域窗口滤波,平滑前和平滑后在相邻特征边界处对比示意图。其中 P_{id} 为平滑前数据的理论分段点, P_l 为经公式 (2) 算法平滑后得到的左端点(即平滑后数据的数据点), P_r 为经公式 (3) 算法平滑后得到的右端点,由图可知不同邻域窗口的滤波器平滑后分段点分别偏向相反方向。所以这里利用平滑后分段点相对原始分段点偏移的特点,可以把平滑后的分段点 P_l 和 P_r 分别作为原始分段点区间 S 的左右端点。

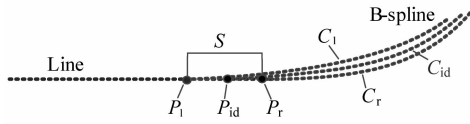
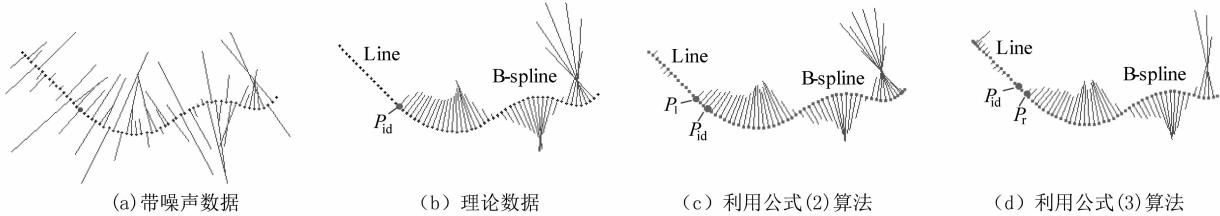
图2 提取左端点 P_l 和右端点 P_r Figure 2 Extracting left endpoint P_l and right endpoint P_r 

图3 平滑前后曲率分析

Figure 3 Curvature analysis before and after smoothing

3 截面数据精确分段

目前的一些截面数据分段方法都只是在现有的数据点中选择分段点进行数据分割,但因采样密度的不同和噪声等因素的影响,实际的分段点一般不会正好是现有的数据点,而可能在某两个数据点区间。那为了对轮廓数据进行精确的分段,得到精确的分段点,需要在得到的区间 S 内进一步的搜索(包括 S 内相邻数据点之间),以得到能更好的反映初始设计意图的分段点,此过程中所用的为原始带噪声的数据。

首先,在确定分段点区间 S 的左右端点后,以左端点 P_l 作为边界点提取直线特征数据并拟合直线(原始带噪声数据)。然后,以区间 S 的中点 P_{id} (投影在拟合的直线上)为边界点提取自由特征点列,并基于与相邻直线的 G^1 连续约束拟合 B 样条曲线;最后,在区间 S 内分别向相反的两个方向迭代样条曲线的首个控制点 P_0 ,并计算数据点到拟合样条曲线的平均逼近误差,以平均逼近误差最小时对应的样条曲线的首个控制点作为截面数据分割的最终分段点。

3.1 曲线拟合

设以 P_l 为边界点的所有原始直线特征数据点为 $I_l = \{p_0, \dots, p_l\}$, 其中 $l < m$ 。

直线的表达式为

$$f_1(x, y) = l_0x + l_1y + l_2 = 0 \quad (4)$$

其中参数 l_0, l_1, l_2 满足法约束条件 $l_0^2 + l_1^2 - 1 = 0^{[10]}$ 。

直线最小二乘拟合的目标函数为

$$\min \sum_{i=0}^l (l_0x_i + l_1y_i + l_2)^2 \quad (5)$$

为了能提取出经平滑后的数据分段点 P_l 或 P_r , 设定曲率阈值 K_1 , 当在边界特征过渡区域内的数据点曲率值大于 K_1 时, 该数据点作为区间 S 的端点。这里曲率阈值 K_1 为平滑后的部分直线点列曲率值的均值。图 3 中, 分别为理论数据(已知理论分段点 P_{id})、带噪声数据(在理论数据中加入高斯噪声)和对带噪声数据经不同的平滑后曲率分析对比示意, 其中图 3(c) 和图 3(d) 中的平滑次数皆为 5 次。

B 样条曲线定义式^[2]为

$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,k}(u) P_i, (u_{k-1} \leq u \leq u_{n+1}, n \geq k-1) \quad (6)$$

其中 $N_{i,k}(u)$ 是定义在节点矢量 $U = \{u_0, u_1, \dots, u_k, \dots, u_n, \dots, u_{n+k}\}$ 上的 k (次数加 1) 阶 B 样条基函数, $P_i (i=0, 1, \dots, n)$ 是控制顶点。本文采用的是三次 B 样条曲线, 即阶数 k 为 4。

对数据点 $I_b = \{q_i, \dots, q_m\}, t < m$ 进行基于与直线 G^1 连续约束的 B 样条曲线最小二乘拟合目标函数为

$$\min \sum_{j=t}^m (\text{dist}(C(u_j) - q_j))^2 = \sum_{j=t}^m \left[\sum_{i=0}^n N_{i,k}(u_j) P_i - q_j \right]^2 \quad (7)$$

B 样条曲线与直线的相切约束为

$$\begin{cases} d(P_i - f_1) = 0 \\ d(P_{i-1} - f_1) = 0, i = 1, n \end{cases} \quad (8)$$

其中 P_i 为控制顶点, f_i 为相邻直线, 公式(8)表示控制点 P_i 到直线 f_i 的距离为 0。约束为线性约束, 可应用拉格朗日乘子法求解出原方程解 X 。

3.2 误差判断搜索精确分段点

在拟合完样条曲线之后, 以区间 S 的中点 P_{id} 为迭代初值在区间内向相反两个方向迭代 P_0 , 图 4 为搜索精确分段点示意图。这里当迭代第一个控制点 P_0 时并不是单纯的影响局部的拟合效果(即所谓的 B 样条曲线的局部性), 其对整条曲线拟合效果的影响随着对应的节点矢量增大而减弱。该方法中的数据点参数

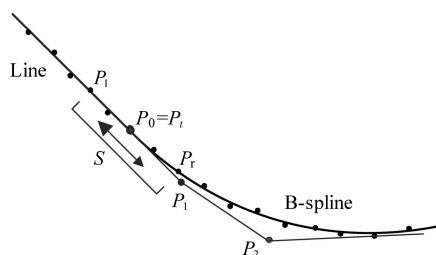


图4 搜索精确分段点

Figure 4 Search accurate segmentation point

和节点矢量将随之作相应改变。设 B 样条点列 $I_b = \{q_t, \dots, q_m\}$ 具体算法步骤如下:

1) 选定迭代初值 $P_0 = P_t, q_t = P_t$;

2) 设置迭代步长 h 及迭代方向;

3) 第一个数据点参数变化量 $u_d = v_{t+1} \cdot$

$\frac{|P_0 \mp q_t|}{|q_{t+1} \mp q_t|}$ (正负号表示迭代方向相反,下同);

4) 内部自由特征数据点的参数和节点矢量变为

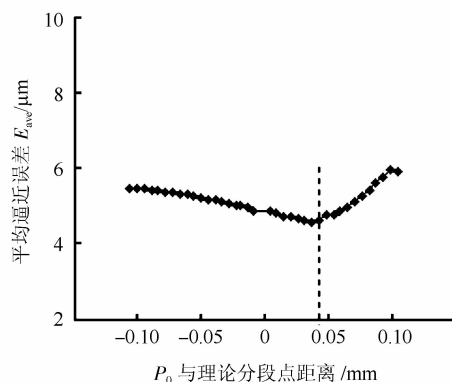
$$v'_i = \frac{v_i \mp u_d}{1 \mp u_d}, u'_j = \frac{u_j \mp u_d}{1 \mp u_d}, i \in [t+1, \dots, m-1], j \in [4, \dots, n];$$

5) 计算样条曲线对数据点的逼近误差 ε_i 并求其

$$\text{平均误差 } E_{\text{ave}} = \frac{1}{m-t+1} \sum_{i=t}^m \varepsilon_i.$$

其中 v_i 和 v'_i 分别为变化前后的数据点的参数值, u_j 和 u'_j 分别为变化前后的节点矢量。分析每次迭代求得平均逼近误差趋势如图 5 所示。此时当分段点取 E_{ave} 为最小值对应的控制点 P_0 的位置时,对截面数据的分割能够达到较高的精度,而因此最终重构

的截面曲线更能反映初始设计意图。

图5 迭代 P_0 时对应的 E_{ave} Figure 5 Iteration P_0 corresponding E_{ave}

4 实验与分析

为验证上述方法的可行性与有效性,下面对带噪声的截面数据利用上述方法进行分段点提取并对数据分段,并用 VC++ 编程对最终结果进行相关数据分析。这里对截面数据分段结果评价的主要内容有:实际分段点 P_{re} 到理论分段点 P_{id} 的距离误差 s_{re} ;重构结果 B 样条曲线的所有数据点的平均逼近误差 E_{ave} 和最大距离误差 E_{max} 。图 6 所示为对截面数据分段及最终重构的示意图,其中图 6(a) 中的带噪声的数据是在理论数据点(已知理论模型)中加入 $8 \mu\text{m}$ 的高斯噪声,数据点个数为 62 个,采样平均密度为 0.1 mm ,理论分段点 P_{id} 坐标为 $(2.200 \ 0, 2.200 \ 0)$,图 6(b) 中的实际分段点 P_{re} 坐标为 $(2.225 \ 7, 2.223 \ 7)$;图 6(c) 为分段点处数据的局部放大图。

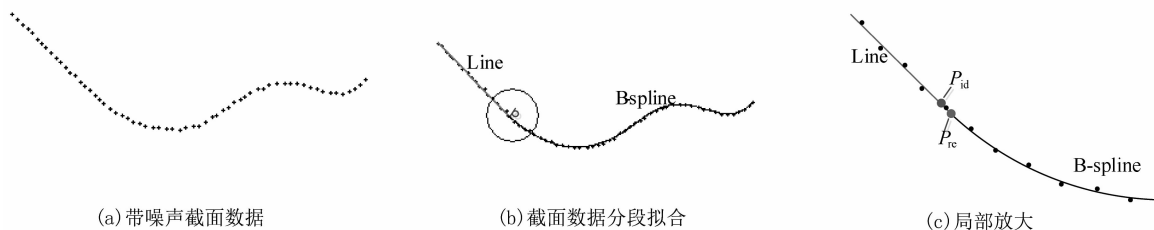


图6 截面数据精确分段及重构

Figure 6 Sectional data accurate segmentation and reconstruction

分析表 1 中各个数据结果,对实际分段点到理论分段点的距离误差 s_{re} ,本文方法中分段点的提取或数据分割精度能达到 0.05 mm (小于采样密度 0.10 mm) 之内,且根据样条曲线的平均逼近误差 E_{ave} 和最大逼近误差 E_{max} 可知,最终截面曲线有很好的重构质量。

表1 分段点与逼近误差分析

Table 1 Error analysis

P_{re}/mm	P_{id}/mm	s_{re}/mm	E_{ave}/mm	E_{max}/mm
$(2.225 \ 7, 2.223 \ 7)$	$(2.200 \ 0, 2.200 \ 0)$	$0.035 \ 0$	$0.008 \ 7$	$0.025 \ 3$

(下转第 77 页)