

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.02.007

基于 G1 连续的圆弧与 B 样条分段点 区间确定及重构方法

冯兴辉, 张旭, 金龙, 刘栋

(上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘要:在逆向工程中,截面曲线重构质量的高低决定了能否更好地反映物体的初始设计意图。高精度分段点的提取则是提高重构质量的关键。针对圆弧与 B 样条曲线重构过程中,无法确定分段点所在区间问题,提出了圆弧与 B 样条线性化处理方法,并结合基于数理统计原理的分段点区间确定办法和基于黄金分割法的重构方法,提取了圆弧与 B 样条间的高精度分段点。实例证明该方法能在现存数据之间搜寻精度更高的分段点。该方法有效地解决了圆弧与 B 样条高精度分段点提取问题。

关键词:逆向工程;截面重构;分段点区间;线性化

中图分类号:TB115 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2895(2016)02-0030-04

Arc and B-Spline Piecewise Interval and Reconstruction Method Research Based on G1 Continuous Circular

FENG Xinghui, ZHANG Xu, JING Long, LIU Dong

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

Abstract: In the reverse engineering, the quality of cross section curve reconstruction determines the initial design intent which can better reflect the object or not. High precision segmentation points extraction is the key to improve the quality of reconstruction. For circular arc with B-spline curve reconstruction process, the point of uncertain piecewise interval problems, the circular arc with B-spline linearization method was put forward. Connecting with the point of piecewise interval on the basis of the principle of mathematical statistics method and reconstruction method based on the golden section method, the high precision between the arc and B-spline segments were extracted. The living example proved that the method could search for high segment among the existing data. The method is effective to solve the precision segmentation point extraction of arc with B-spline.

Key words: reverse engineering; cross-sectional reconstruction; segmentation point interval; linearization

随着科技的不断进步,获得物体的点云数据变得越来越方便,但如何处理数据,得到物体的最原始的设计信息,成为逆向工程研究的重点。在逆向工程中,二维截面曲线的重构是曲面重构的基础,其中分段点的提取则是二维截面曲线进行高质量重构的关键。然而对分段点的提取一般先确定分段点所在的区间。

在现阶段的研究中,直线与 B 样条的分段点区间确定问题已得到较好解决,圆弧与 B 样条分段点区间的确定问题在进一步的研究中。章海波^{[1]154}提出了一

种改进的高精度截面数据重构方法,但在分段点区间的初步确定过程中需依据个人经验大致确定一个区间,存在着人机交互行为;张冉^[2]针对直线和自由曲线提出了截面数据精确分段方法,此方法可用于直线与 B 样条分段点区间确定及重构情形;赵伟玲^[3]提出了散乱点云中圆的提取办法,对圆特征的边界提取问题做了详细阐述;王英惠^[4]提出一种近似曲率法来识别平面轮廓的特征点,解决了由直线和圆弧构成的平面轮廓精确重构问题,满足轮廓各段之间位置连续以

收稿日期:2015-09-27;修回日期:2015-11-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51205246);上海高校青年教师培养资助计划资助(shgcjs024)。

作者简介:冯兴辉(1989),男,山东枣庄人,硕士,主要研究方向为逆向工程、CAD/CG。E-mail:931403343@qq.com

及相切条件。

针对以上不足,本文提出一种圆弧与 B 样条线性化处理方法,然后利用基于数理统计原理的分段点区间确定方法找到分段点所在区间,最后结合基于黄金分割法的重构方法,提取了圆弧与 B 样条间的高精度分段点。本文特色在于对圆弧与 B 样条的线性化处理,解决了圆弧与 B 样条分段点区间的确定问题,并且避免了在分段点区间确定过程中所存在的人机交互行为。

1 分段点所在区间的确定^[5-8]

1.1 圆弧与 B 样条线性化处理

由于基于数理统计的分段点确定方法在用于圆弧和 B 样条时效果不甚理想,所以需对圆弧和 B 样条进行转换处理。在截面数据点的拟合过程中,圆弧的拟合相对比较容易,即将确定为圆弧上的数据点拟合圆,然后分别计算各个点到所拟合圆弧圆心的距离,见图 1。并将各点对应到圆心的距离反映到坐标系中。其中,以点到圆心的距离为纵坐标,以各个数据点对应的序号作为横坐标,从而就将圆弧与样条的问题进行了线性化处理,解决了圆弧与 B 样条区间确定的问题,如图 2 所示。

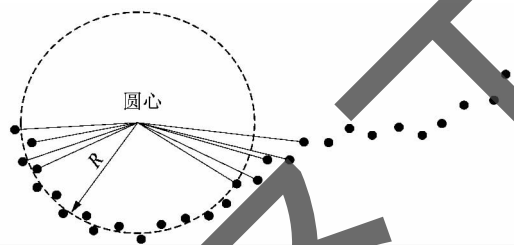


图 1 计算各个点到拟合圆弧圆心距离

Figure 1 Calculate distance of various points to center of circle

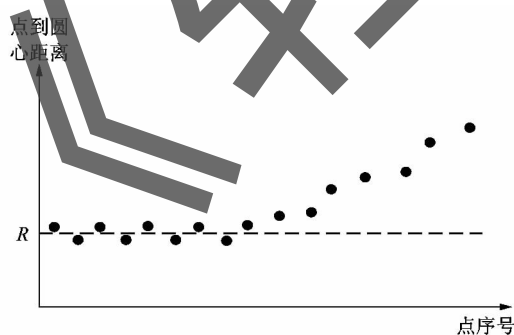


图 2 圆弧与 B 样条线性化示意图

Figure 2 Linear sketch of arc and B-spline

1.2 区间右端点的确定

连续型随机变量 X 的密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad -\infty < x < +\infty,$$

则随机变量 X 服从参数为 μ, σ 的正态分布,记为 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。式中: μ 为随机变量的均值, σ 为随机变量的标准差。

在此利用基于 3σ 原则的分段点区间右端点的确定方法,找到第一个跳出区间的点 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$,即为分段点所在区间的右端点 P_{right} ,如图 3 所示。

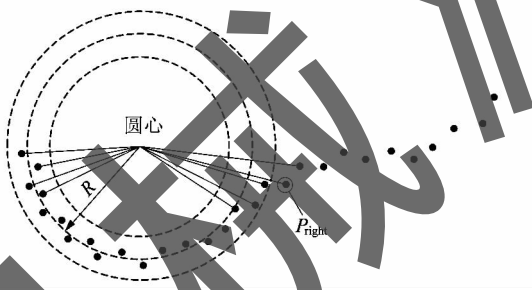


图 3 分段点区间右端点确定示意图

Figure 3 Determine sketch of right endpoint of interval

1.3 区间左端点的确定

相关系数是用来度量变量间相关关系的一类指标的统称。但就参数值而言,常用的是皮尔逊矩相关系数(简称相关系数,记作 ρ),它是对 2 个随机变量之间线性关系的标准化测量。具体定义为:随机变量 X 和 Y 的数学期望 $E(X), E(Y)$ 反映了 X, Y 各自的平均值,方差 $D(X), D(Y)$ 反映了 X, Y 各自离开均值的偏离程度, $E\{[X - E(X)][Y - E(Y)]\}$ 为随机变量 X, Y 的协方差,即为 $C(X, Y)$ 。则称 $\rho(X, Y) =$

$\frac{C(X, Y)}{\sqrt{D(X)} \sqrt{D(Y)}}$ 为随机变量 X 与 Y 的相关系数,记为

$\rho(X, Y)$ 。相关系数具有以下性质:当 $|\rho| \geq 0.8$ 时,2 个数组可视为高度相关;当 $0.5 \leq |\rho| < 0.8$ 时,可视为中等相关;当 $0.3 \leq |\rho| < 0.5$ 时,可视为中低等相关;当 $|\rho| < 0.3$ 时,说明 2 个数组相关性极弱。在这里,取相关系数中第一个大于 0.5 的点,并将其对应的点作为区间的左端点,记为 P_{left} ,见图 4。

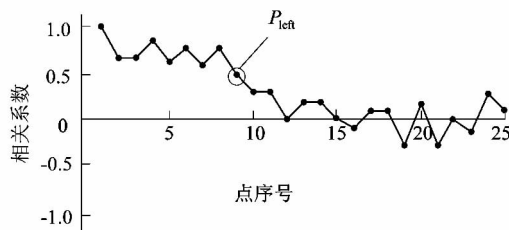


图 4 分段点区间左端点确定示意图

Figure 4 Determine sketch of left endpoint of interval

2 圆弧与 B 样条初步重构

2.1 特征及约束表达式

圆弧解析表达式方程为:

$$a(x^2 + y^2) + bx + cy + d_0 = 0。$$

此时,参数 a, b, c, d_0 为圆弧解析表达式的系数,满足的约束条件为:

$$b^2 + c^2 - 4ad_0 = 1。$$

自由曲线选取最常用的 3 次 B 样条曲线。函数是基于 n, p, U, P 这 4 个参数定义^[9]的,同常先根据节点矢量 U 计算 B 样条的基函数 $N_{i,3}(u)$,其中, n 为控制点个数, p 为 B 样条阶次。定义非均匀节点矢量 U 为:

$$U = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1} \right\}。$$

然后再与控制点 P 一起计算,一条 p 次 $(p+1)$ 阶 B 样条曲线可以被定义为:

$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,3}(u) P_i。$$

式中: P_i 为控制点, $N_{i,3}$ 为样条的基函数。

2.2 初步重构表达式

圆弧最小二乘拟合的目标函数为:

$$\min f(x) = \sum_{i=0}^n d_i = \sum_{i=0}^n ([a, b, c, d][x^2 + y^2, x, y, 1]^T)^2。$$

式中 d_i 为各个数据点到圆弧的有向代数距离。

利用普遍使用的最小二乘法拟合 B 样条曲线。

建立的重构模型(目标函数)如下:

$$\min \sum_{j=0}^m (C(u_j) - Q_j)^2 = \sum_{j=0}^m \left[\sum_{i=0}^n N_{i,k}(u_j) P_i - Q_j \right]^2;$$

$$\min f(P_0) = \sum_{i=0}^n D_i(P_0);$$

$$\text{约束条件} \begin{cases} d(P_i - L_i) = 0 \\ d(P_{i-1} - L_i) = 0; i = 1, n_0 \end{cases}$$

式中: $P = [P_0 \cdots P_n]$ 为控制点; $Q_j = [Q_0 \cdots Q_m]$ 为离散数据点列; $D_i(P_0)$ 是节点区间 $[u_0, u_4]$ 上第 i 个数据点到当前 B 样条曲线的投影距离; L_i 为相邻已知直线; d 为控制点 P_0 到直线 L_0 的距离; $N_{i,k}$ 为 B 样条的基函数。

3 高精度分段点提取

目前在截面数据分段的研究中,许多方法都采用从现有的数据点中寻找分段点从而进行截面数据重构。但由于采样密度和噪声等因素的影响,采集到的数据点中一般不会恰巧包含实际分段点,而最优分段点极有可能在 2 个数据点之间。因此,在确定分段点所在的区间之后利用黄金分割法进一步搜索截面数据的最优分段点,从而更好的提高截面数据重构的精度。

实现的具体算法流程^{[1]158}如图 5 所示。

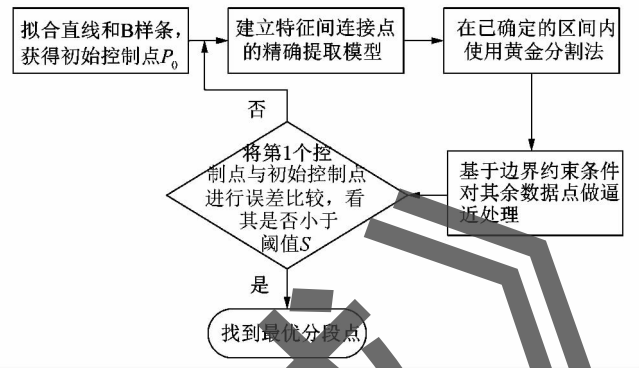


图 5 黄金分割法流程图

Figure 5 Flow chart of golden section method

由以上步骤便可以求出直线与样条数据的最优分段点,进而可以获取更符合初始设计意图的截面重构特征。

4 实例分析

利用 UG NX8.5 设计包含各种截面线的模型如图 6,利用其来检验该方法的可行性。

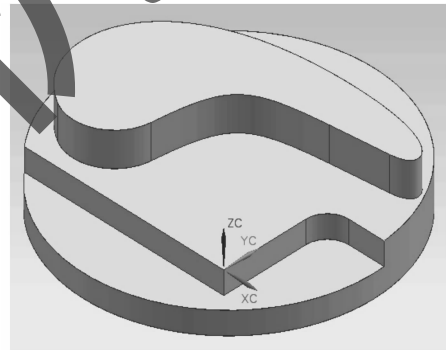


图 6 UG NX8.5 设计的模型图

Figure 6 Design model of UG NX8.5

图 7 为实际加工的模型。然后得到采样密度为 0.5 mm 的截面离散数据点云数据如图 8 所示。



图 7 实际加工和测量的工件

Figure 7 Actual processing and measurement workpiece

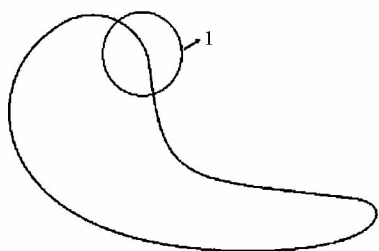


图8 三坐标测量的全部点云数据
Figure 8 Point cloud data of three coordinates measuring machine

取圆圈1内的圆弧与样条数据,理论分段点为 P_{id} (3,2),利用本文方法实现的具体步骤如图9所示,实验得到的具体结果如表1所示。

由表1可知,提取的实际分段点与理论分段点距离小于采样密度(0.05)。也就是说,本文的方法不仅仅在现有数据点中寻找最优分段点,而且可以超越现有数据点寻找更精确的分段点。

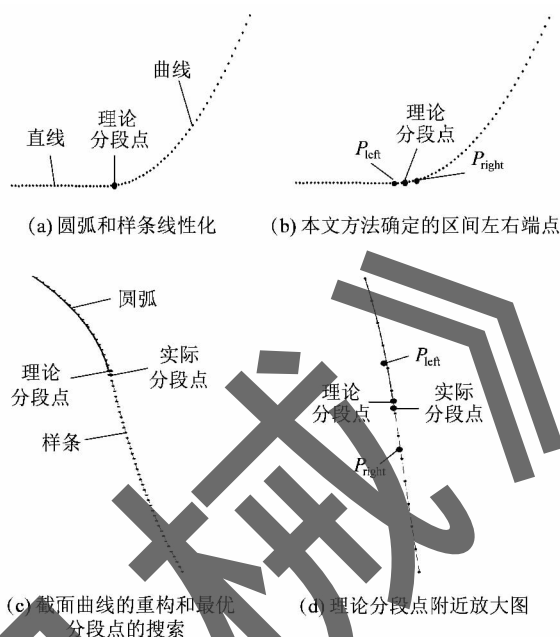


图9 圆弧与样条高精度分段点确定过程
Figure 9 Precision segmentation point determining process of arc with B-spline

表1 2种方法的对比结果

Table 1 Comparison results of two methods

截面曲线 类型	曲线理论 分段点 P_{id}	区间左 端点 P_{left}	区间右 端点 P_{right}	实际提取 分段点 P_{re}	区间长度/ mm	实际提取分段点到 理论分段点距离/mm
分步重构法	(3,2)	(1.016 30,0.029 60)	(5.835 16,3.975 23)	(3.249 003,2.103 09)	6.228 114 303	0.269 494 0
圆弧与样条	(3,2)	(2.360 29,1.297 45)	(3.947 83,2.894 62)	(2.990 030,2.003 09)	2.251 940 300	0.010 435 5

5 结语

本文提出了一种圆弧与 B 样条的分段点区间确定方法,并在已确定的区间内利用黄金分割法进行最优分段点的搜寻,从而进行圆弧与 B 样条的高精度重构。经实例验证该方法:①在现存数据之间搜寻精度更高的分段点;②使初始确定的区间范围进一步缩小,且有效地避免了区间确定过程中的人机交互行为;③截面数据重构的精度有所提高。但截面数据中还包含着除了 G^1 约束以外 G^2 等其他约束,这也是以后研究的重点。

参考文献:

- [1] 章海波,张旭,张冉,等. G1 连续的截面数据高精度重构方法研究[J/OL]. 机械工程学报,2015,51(3):153-160. (2014-12-11) [2015-09-10]. <http://www.cnki.net/KCMS/>. DOI: 10.3901/JME.2015.03.153.
- [2] 张冉,张旭,章海波. 截面数据精确分段方法研究[J]. 轻工机械,

2014,32(6):70-73.

- [3] 赵伟玲. 三维点云数据的预处理和圆提取算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学,2008:41-43.
- [4] 王英惠,吴维勇. 基于分段与识别技术的平面轮廓的精确重构[J]. 工程图学学报,2007,28(5):43-48.
- [5] 陈希孺. 概率论与数理统计[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社,2009.
- [6] LÜ Qiujuan, FANG Suping, ZHANG Zhen. Feature points extraction of different structure for industrial computed tomography image contour[J]. Optik-international journal for light and electron optics, 2013, 124(22):5313-5317.
- [7] 温银放. 数据点云预处理及特征角点的检测算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学,2007:56-57.
- [8] 胡鑫,习俊通,金桦. 基于图像法的点云数据边界自动提取[J]. 上海交通大学学报,2002,36(8):1118-1120.
- [9] 施法中. 计算机辅助设计与非均匀有理 B 样条[M]. 北京: 高等教育出版社,2001.