DOI: 10.3901/JME.2015.03.153

G^1 连续的截面数据高精度重构方法研究*

章海波¹ 张旭¹ 张冉¹ 张学昌²

(1. 上海工程技术大学机械工程学院 上海 201620;

2. 浙江大学宁波理工学院 宁波 315100)

摘要: 针对逆向工程中分段点无法精确提取导致边界约束信息不准确,进而造成截面特征重构结果不理想的问题,提出一种高精度截面数据重构方法。根据截面数据的离散曲率信息初步提取分段点,确定理想分段点所在区域,并以区域端点为界将截面数据分割成具有单一特征的数据段;优先重构直线,再重构自由特征:耦合边界约束模型和自由特征自身的重构模型,建立优化模型,采用拉格朗日乘子法求解。在自由特征的重构过程中,建立特征间连接点的精确提取模型,利用黄金分割法动态搜索最优连接点。实例分析表明,由于特征间连接点的高精度识别,使得重构结果能很好地还原产品模型的初始设计意图,提高了重构三维 CAD 模型的精度和质量。

关键词: 逆向工程; 截面特征; 分段点; 精准重构; 边界约束

中图分类号: TP391

Research on High-precision Reconstruction of the G^1 Continuous Cross Section Data

ZHANG Haibo¹ ZHANG Xu¹ ZHANG Ran¹ ZHANG Xuechang²

(1. College of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620;

2. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100)

Abstract: A high-precision method is proposed to solve the non-ideal cross section feature reconstruction, because the boundary constraint is imprecise, which is caused by the inaccurate segment point in reverse engineering. According to the discrete curvature of the cross section data information, extract segment points preliminary, determine the ideal region of segment points, and divide sectional data into single feature data segment by a regional endpoint. Reconstruct the line first, and then reconstruct free features. Construct optimization model based on boundary constraint model and free feature reconstruction model, use the Lagrange multiplier method to solve this optimization model. In the process of free feature reconstruction, extraction model of precise connection points between features is set up, using the golden section method dynamic to search the optimal point. Examples show that the reconstruction result can restore the original design intent of the product model, and improve the reconstruction accuracy and quality of three dimensional CAD model.

Key words: reverse engineering; cross section feature; segment point; high-precision reconstruction; boundary constrain

0 前言

在逆向工程中,产品建模通常遵循从二维到三维的基本原则:先进行二维截面曲线的重构,然后通过拉伸、旋转、扫成或蒙皮等方法重构出曲面或实体的三维 CAD 模型。因此,二维截面曲线重构的精度高低、质量好坏直接影响三维重构模型能否最大程度复原初始设计意图。近年来,国内外诸多

学者对截面曲线的重构进行了大量的研究。文献[1-2]采用多段直线段来重构截面曲线。文献[3-5]采用单一 B 样条曲线来重构截面曲线。这些方法虽然简单便于实现,但会缺失数据中的自然属性信息,从而难以获得满足初始设计意图的模型。为了丰富截面曲线的内涵信息量,BENKŐ 等^[6]采用直线和圆弧特征来重构截面曲线,并在特征间添加了约束关系,但很难表述复杂形状的截面曲线。IMANI 等^[7]利用非均匀有理 B 样条(NURBS)曲线,辅以约束条件重构截面曲线,但 NURBS 由于权因子与参数化问题而使得求解变得复杂。文献[8-9]综合考虑直线、圆弧和自由曲线以及工程约束来整体优化重构截面

* 国家自然科学基金(51205246)、上海高校青年教师培养资助计划(shgcjs024)和浙江省自然科学基金(Y1100073)资助项目。20140204 收到初稿,20141015 收到修改稿

曲线。刘云峰等^[10-11]对截面数据的整体优化重构问题进行了研究,将二维截面数据中的所有信息一同优化拟合,采用惩罚函数法将约束优化模型的求解变为非线性无约束优化问题,用 Levenberg-Marquardt 方法进行迭代求解。该方法的优点在于重构结果满足所有的约束信息以及具有较好的整体光顺性,缺点在于相邻特征间的连接点提取精度不够,从而牺牲了曲线的逼近效果。

针对以上不足,本文提出一种新的截面数据精确重构方法,重点研究相邻特征为直线和自由特征的截面数据重构。采用分步拟合的思想^[12]:初步提取分段点后,先重构直线特征,然后基于边界约束模型重构自由特征。本文的特色在于重构自由特征时,融入了特征间连接点的精确提取模型,利用黄金分割法动态搜索最优连接点,使重构的截面曲线既满足了特征间的几何连续性条件,又找到了高精度的连接点,从而显著提高了截面曲线的重构精度。

1 分段点的初步提取

对于一组有序截面数据点列,通常根据截面数据点的曲率信息,交互式提取截面数据分段点,然后将截面数据分割成每段只具有单一特征的数据段。如图1所示,可以这样估算离散数据点的曲率值^[13]:定义数据点 $p_i (i=1,2,\dots,n-1)$ 处的离散曲率 k_i 为插值于点 p_{i-1} 、 p_i 和 p_{i+1} 圆弧的曲率,即

$$k_i = \frac{2\Delta p_{i-1}p_i p_{i+1}}{l_i l_{i+1} l'_i} = \text{sgn}(p_{i-1}p_i p_{i+1}) \frac{\sin \alpha_i}{l'_i} \quad (1)$$

式中 l'_i —— p_{i-1} 和 p_{i+1} 之间的弦长;
 α_i ——线段 $p_{i-1}p_i$ 的延长线与线段 $p_i p_{i+1}$ 之间的夹角;
 $\Delta p_{i-1}p_i p_{i+1}$ ——三角形的有向面积,规定 p_{i-1} 、 p_i 和 p_{i+1} 为逆时针方向时,面积为正,反之为负。

图1 数据点的离散曲率估算

从截面数据中提取分段点,具有如下特点。

(1) 截面数据是离散的,受采样密度、采样方法等影响,截面数据中一般不会精确存在 G^0 点、 G^1 点。

(2) 即使截面数据中刚好存在精确的 G^0 点、 G^1 点,那么由于上面提出的计算方法是对离散点处的曲率的一种近似估算,而且由于噪声等影响因素,一般不能准确提取出理想的分段点。

(3) 实际上,根据交互方式提取的分段点通常是理想分段点附近的近似分段点。

这样,只能确定理想分段点存在的大致区间。如图2所示,只能将 P' 点提取为分段点,确定理想分段点在 P' 和 P'' 之间。当然,根据实际情况,这个区域可能取得会大些。

图2 理论分段点 P 和提取分段点 P'

2 截面数据分步重构

截面曲线是构建曲面的基础,能否重构出满足初始设计意图的截面曲线决定了重构 CAD 模型质量的好坏。在重构过程中,采用分步拟合的思想,优先重构自由度较少的直线,保证其重构精度;再基于边界相切约束条件重构可控性大的自由特征。这种方法为目前最常用的截面数据重构实际操作方法,这里将其称为分步重构法。

2.1 直线的重构

直线的解析表达式为

$$l_0 x + l_1 y + l_2 = 0 \quad (2)$$

且参数 l_0, l_1, l_2 满足规范化约束条件^[14]

$$l_0^2 + l_1^2 - 1 = 0 \quad (3)$$

此时,点到直线的有向代数距离 $d = l_0 x + l_1 y + l_2$, 点到直线的欧氏距离 $l_0 x + l_1 y + l_2 / \sqrt{l_0^2 + l_1^2} = |l_0 x + l_1 y + l_2| / \sqrt{l_0^2 + l_1^2} = |d|$ 。给定 $n+1$ 个数据点,用最小二乘的方法拟合直线。

建立如下目标函数

$$\min f(X) = \sum_{i=0}^n d_i^2 = \sum_{i=0}^n |l_0 x_i + l_1 y_i + l_2|^2 =$$

$$(l_0 \ l_1 \ l_2) \begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & n+1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_0 \\ l_1 \\ l_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

s.t. $l_0^2 + l_1^2 - 1 = 0$

式中 d_i ——各个数据点到直线的有向代数距离;

$\mathbf{X}$ ——直线的参数矩阵;

$\mathbf{X} = (l_0 \ l_1 \ l_2)$ 。

2.2 自由特征的重构

自由特征采用 B 样条曲线来表达, 而要定义一条 B 样条曲线, 需要 $n, p, \mathbf{U}, \mathbf{P}$ 四个设计参数。故重构 B 样条曲线时, 要想完全反求出曲线本身原有的设计参数, 并且考虑采集点云数据往往与原始曲线具有误差的因素, 普遍是采用最小二乘的方法拟合 B 样条曲线, 让曲线在指定的某个误差限 E 内逼近数据点。而整个过程的第一步便是节点矢量的配置, 这一步是人为干预的。但节点的位置对 B 样条曲线的形状具有一定的影响, MA 等^[15]提出拟合曲线的保形性受节点矢量的配置、点集参数化以及误差界的影响。陈凯云等^[16]证明了不同的节点矢量对 B 样条曲线形状具有的影响。所以, 不能忽视对节点矢量的研究。

2.2.1 节点矢量的配置

二维截面曲线的特征点根据曲线的连续阶可分为跳跃点(G^0 位置不连续点)、尖点(G^1 切矢不连续点)、折痕点(G^2 曲率不连续点)、曲率极值点和拐点。 p 次 B 样条曲线在其定义域内的非零节点区间内部或在每一曲线段内部具有无穷阶参数连续性; 在定义域内重复度为 r 的节点处则具有 $p-r$ 阶参数连续性。二维截面曲线在这些节点处根据 $p-r$ 阶参数连续性, 就成为跳跃点、尖点、折痕点曲率极值点和拐点。在二维截面曲线正向设计中, 这些特征点就是设计者的设计意图。由它们所对应的节点组成的节点矢量 $\mathbf{U}$, 具有曲线本身自然参数化属性。为了还原设计者的意图, 必须使得反求后的曲线趋向于这种自然参数化。针对 B 样条曲线如何配置节点矢量, 而不成成为影响直线与 B 样条曲线端部拼接的主要因素, 只要寻找到一种包含着自然参数化最优节点的节点矢量配置即可。在本文中, 假设已知数据是有序的, 从 2 次 B 样条曲线插值开始, 然后节点消去, 再反求 3 次 B 样条曲线, 具体算法如下。

(1) 对给定的二维点列 $\mathbf{Q} = \{Q_i(x_i, y_i)\}_{i=0}^m$, 进行规范积累弦长参数化, 得到 $\mathbf{U} = \{\tilde{u}_i\}_{i=0}^m$ 。

(2) 对数据点进行 2 次 B 样条曲线插值, 得到

曲线 C_0 。

(3) 基于误差限 E , 对曲线 C_0 进行节点消去, 得到曲线 C_1 , 此时曲线 C_1 在误差限 E 内与 C_0 重合;

(4) 对步骤(3)中得到的节点矢量进行端点 4 重处理, 并修改相应的控制点数目, 然后对所有数据点进行 3 次 B 样条曲线最小二乘拟合, 得到 3 次曲线 C_2 。

2.2.2 基于边界约束条件的 B 样条曲线重构

目前最常用的 B 样条曲线为 3 次 B 样条曲线, 这里研究 3 次 B 样条曲线与直线的光滑(G^1 连续)拼接。受 4 重端节点的 3 次固支 B 样条曲线在 $u_0=0$, $u_m=1$ 处曲线与控制多边形相切的启发, 建立如下重构模型。

目标函数

$$\min f(\mathbf{P}) = \sum_{i=0}^m [Q_i - C(\tilde{u}_i)]^2 = \sum_{i=0}^m \left[Q_i - \sum_{j=0}^n N_{j,3}(\tilde{u}_i) P_j \right]^2$$

s.t. $\begin{cases} d(P_j - L_j) = 0 \\ d(P_{j-1} - L_j) = 0 \end{cases} \quad j=1, n \quad (5)$

式中 L_j ——相邻已知直线;

Q_i ——二维点列 $\mathbf{Q} = \{Q_i(x_i, y_i)\}_{i=0}^m$;

$\mathbf{P}$ ——B 样条曲线的控制点组成的矢量;

$\mathbf{P} = (P_0 \ P_1 \ \cdots \ P_n)$ 。

这是一个约束最小化问题, 涉及 $n+1$ 个未知量(控制点 P_i)和 4 个约束条件(控制点 P_0, P_1 在直线 L_1 上; 控制点 P_{n-1}, P_n 在直线 L_n 上)。标准的解法是采用拉格朗日乘子法, 具体做法是引入 4 个额外的变量 $\lambda_i (i=0,1,2,3)$, 最后得到一个系数矩阵为 $n+5$ 阶分块矩阵的线性方程组。

设 $\mathbf{A}=(\lambda_i)$, $i=0,1,2,3$, 是拉格朗日乘子组成的矢量; 非约束数据相应的方程组为 $\mathbf{NP}=\mathbf{Q}$; 约束数据相应的方程组为 $\mathbf{MP}=\mathbf{T}$ 。非约束方程组的误差残差为 $\mathbf{Q}-\mathbf{NP}$, 要在满足约束条件 $\mathbf{MP}=\mathbf{T}$ 的前提下, 使得这个误差的平方和最小。因此, 根据拉格朗日乘子法, 要使以下关于未知量 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{P}$ 的表达式

$$(\mathbf{Q}^T - \mathbf{P}^T \mathbf{N}^T)(\mathbf{Q} - \mathbf{NP}) + \mathbf{A}^T(\mathbf{MP} - \mathbf{T}) \quad (6)$$

达到最小。分别对 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{P}$ 求导, 并令其等于零得

$$-2(\mathbf{Q}^T \mathbf{N} - \mathbf{P}^T \mathbf{N}^T \mathbf{N}) + \mathbf{A}^T \mathbf{M} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{MP} - \mathbf{T} = \mathbf{0} \quad (7)$$

进一步处理得

$$N^T NP + M^T A = N^T Q$$

$$MP = T \quad (8)$$

可以写成分块矩阵的形式

$$\begin{pmatrix} N^T N & M^T \\ M & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P \\ A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N^T Q \\ T \end{pmatrix} \quad (9)$$

求解这个方程组, 得到 A 和 P 。

3 重构模型检验及改进

3.1 重构模型检验

为了对带边界约束条件的 B 样条曲线的拟合模型进行验证, 利用 UG NX 7.5 构建一个直线与 B 样条曲线相连接的二维草图, 如图 3a 所示, 一条 B 样条曲线同时与两条直线相互连接。再利用 UG NX7.5 的二次开发技术, 采集曲线上的点集数据(人为控制 B 样条数据右端采集到了理论连接点), 然后利用 Visual Studio 2010, 编制配置节点矢量和利用拉格朗日乘子法求解拟合模型的 C++ 程序, 获得拼接结果, 见图 3b。

对比图 3c、图 3d, 可以明显地发现: 在左边直线与 B 样条曲线拼接处, B 样条曲线拟合偏差较大, 数据点在样条曲线的一侧; 在右边直线与 B 样条曲线拼接处, 情况则比较良好。此外, 再输出 B 样条曲线首末两端部分数据点的到曲线的投影距离, 如表 1 所示。

(a) 直线与 B 样条曲线相连接的二维草图

(b) 拼接结果

(c) 左端局部放大图

(d) 右端局部放大图

图 3 理论离散数据的重构

表 1 B 样条曲线部分数据点 $Q_i(i=0,1,\dots,10)$ 到曲线的投影距离

	Q_0	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7	Q_8	Q_9	Q_{10}
左端	0.013	0.015	0.013	0.010	0.005	0.001	0.006	0.008	0.008	0.001	0.004
右端	0	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0	0.001	0.001	0	0

从表 1 中可以发现, B 样条曲线左端拼接处部分数据点与右端数据点的投影误差不在同一个数量级上, 且处在节点区间 $[u_0, u_4]$ 内的数据点的投影误差尤其较大。进而可以得出结论: 此理论模型在整体上, 较好地拟合了 B 样条曲线, 并且直线和 B 样条曲线严格地满足了 G^1 连续, 不存在约束误差, 但是以非理论切点为分段点的 B 样条曲线的左端, 其第一个非零节点区间与其他区间内数据点的逼近误差存在较大差异。

3.2 原因分析

分段点的提取影响了节点矢量的配置, 影响了拼接处附近数据点的逼近误差。在 B 样条曲线拟合前的点云数据积累弦长参数化和配置节点矢量的过程中, 无论采用何种方法得到的包含最优节点矢量

配置, 它的第一个和最后一个节点必然是与分段点对应的。而在点集的预处理中, 分段点的提取是人为的、主观的。数据点的归属判断受操作者的主观因素影响较大。例如, 操作者极有可能会将原本属于直线段的数据点主观片面地判定给与它相连接的 B 样条曲线段或圆弧段。见图 4, 提取分段点时, 通过曲率分析, 极有可能将原本属于直线段的数据点 A 判定给 B 样条曲线。最优的情况是, 操作者将 A 点或 B 点判定为分段点, 但是很可能会出现将 A 、 B 点周围的点判定为分段点, 这都将影响 B 样条曲线自身的拟合, 后者的影响更大。以上在第 3.1 节模型检验中, B 样条曲线两端分别提取的近似分段点(理想切点附近的数据点)和理论分段点(理论切点)参与拟合后, 左右端局部数据点的逼近误差存在差异, 即可证明此点。

图 4 离散数据点的曲率分析

为了解决这个问题,在建立数学模型时,特地在建立了 B 样条曲线逼近每个数据点的最小二乘拟合模型时,耦合了边界约束条件,期望直接求得设计者所设计的理论连接点。这似乎是合情合理的,但结果不尽如人意。

因为还存在基础理论缺陷。一条 B 样条曲线是基于 n, p, U, P 这四个参数定义的。通常先根据节点矢量 U 计算出 B 样条基函数,然后与控制顶点 P 一起,计算 $C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,3}(u)P_i, u \in [0,1]$,从而得到一条 B 样条曲线。但不管耦合多少边界条件, B 样条曲线上的第一个点(节点 $u=0$ 处的点),既是 B 样条曲线与直线的连接点,又是 B 样条曲线的第一个控制点。可以这样计算,由于 $0 \in [u_0, u_4]$,且 3 次 B 样条曲线在端部是 4 重节点,故

$$C(0) = \sum_{i=0}^n N_{i,3}(0)P_i = N_{0,3}P_0 = P_0 \quad (10)$$

而在数学模型中,采用最小二乘的方法反求 B 样条曲线的控制顶点。若此数学模型仅仅是单个独立的 B 样条曲线的反求模型,所求出的控制点 P_0 ,只是第一个数据点(即人为提取的分段点)附近的一个点,且几乎重合;若耦合边界约束模型,并且利用拉格朗日乘子法求解,所求出的控制点 P_0 ,是不含边界约束条件求出的控制点 P_0 在约束直线上的投影点。

综上所述,基于现有 B 样条曲线的定义,求解出来的连接点总是依赖于人为提取的分段点,与初始的连接点距离偏差较大,同时也导致了逼近误差较大,不符合设计者的设计意图。

3.3 改进措施

B 样条曲线需要修改的区域为直线和 B 样条曲线的拼接点附近。根据 B 样条曲线具有局部修改性的性质,可以通过移动相关控制点来修改拼接处 B 样条曲线的形状。所谓局部修改性,就是移动 P_i ,只改变 B 样条曲线 $C(u)$ 在区间 $[u_i, u_{i+p+1}]$ 上的形状。如图 5 所示,给定由节点矢量 $U=[u_0, u_{15}]$ 和控制点

$P_0, \dots, P_{11}$ 定义的 3 次 B 样条曲线,若移动控制点 P_0 , B 样条曲线在节点区间 $[u_0, u_4]$ 上的形状会发生改变。所以,在第 3.1 节模型检验中出现的节点区间 $[u_0, u_4]$ 上数据点投影距离较大的问题,根据这一性质,可以按照下面这样来修改。

图 5 三次 B 样条基函数与节点区间对应图

建立如下目标函数

$$\begin{aligned} \min f(P_0) &= \sum_{i=0}^n D_i(P_0) \\ \text{s.t. } d(P_0 - L_0) &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式中 L_0 ——与 B 样条曲线拼接的直线;

D_i ——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;

d ——控制点 P_0 到直线 L_0 的距离。

可以看出,这是一个一维搜索问题:控制点 P_0 在直线上某个区间内移动,使得 B 样条曲线在第一个节点区间上对应的数据点到曲线的投影距离之和 $f(P_0)$ 最小。可以利用一维搜索试探方法求解,最常用的方法是黄金分割法。若数据的采样密度是 $D=0.1 \text{ mm}$,由于分段点的人为误判,放大理论切点所在区间的长度至 $2D$,在黄金分割法计算不失真的前提下,在限定次数 11 内, $0.2 \times 0.618^{11} = 0.001 \text{ mm}$,可以获得较优的极值点(连接点)。此外,分别将操作者难以确定归属的 A、B 数据点在直线上的投影点,作为搜索区间 $[a, b]$ 左右端点;并设定搜索区间、目标函数值和控制点收敛精度分别为 S_0, S_1, S_2 。整个黄金分割法的求解过程,具体算法如下。

(1) 根据给定离散数据的曲率信息,初步提取分段点,并确定理想连接点所在点云中的大致区间 $[a, b]$ 。

(2) 先拟合直线,得到直线 L_0 ;再基于边界约束条件(G^1 连续)拟合 B 样条曲线,得到曲线 C_0 ,获得初始控制点,第一个控制点为 P'_0 。

(3) 建立特征间连接点的精确提取模型,设定搜索区间、目标函数值收敛精度分别为 S_0, S_1 ,在直

线 L_0 上的 $[a, b]$ 区间内, 利用黄金分割法动态搜索最优连接点 P_0'' , 并且在搜索过程中, 对于不同的 P_0'' 点, 将数据点重新参数化。

(4) 基于边界约束条件(G^1 连续), 且第一个点插值 P_0'' , 其余数据点做逼近处理, 拟合 B 样条曲线, 得到曲线 C_1 。

(5) 将曲线 C_1 的第一个控制点 P_0'' 与初始控制点第一个控制点 P_0' 进行距离误差比较, 如果结果小于阈值 S_2 , 则找寻的连接点为 $P_0 = (P_0'' + P_0')/2$; 否则将曲线 C_1 的控制点置为初始控制点, 第一个控制点置为 P_0' , 然后转步骤(3)。

对于采样密度较小($D \leq 0.05$ mm)的截面数据, 由于在初始分段点提取过程中, 较难确定原始连接点的区间 $[a, b]$, 采用本文中的方法时, 要放大黄金分割法的动态搜索区间, 以确保, 即使初始分段点提取误差较大, 原始连接点在搜索区间内。

在分步重构法的基础上, 通过黄金分割法动态搜索最优连接点, 进而获取更符合初始设计意图的截面重构特征。这里将改进后的分步重构法称为截面数据的改进重构法。

4 实例分析

为了进一步验证提出的截面数据的高精度重构方法, 给出以下实例分析比较。这里参与比较的方法有三种: 目前逆向工程师实际逆向建模过程中最常用的分步重构法; 浙江大学刘云峰等^[10-11]提出的整体重构法; 本文提出的改进重构法。为了判别重构结果是否符合初始设计意图, 需要将重构结果与理论模型作比较分析, 比较分析的项目包括: 实际提取的连接点 P_p 与理论连接点 P_l 的距离误差 ε_d ; 评价自由特征逼近精度的全部数据点的平均距离误差 ε_w 和最大距离误差 ε_m ; 自由特征在连接点附近一段区间内数据点(由于 B 样条曲线具有局部性, 本文统计前 12 个数据点)的平均距离误差 ε_l 和离散程度 σ_l (数据点到拟合曲线距离误差的方差)。

在实例设计的过程中, 通过离散理论 CAD 模型获取截面离散数据, 重构已知理论模型的离散数据, 以便分析重构结果与理论 CAD 模型的逼近程度。这里的实例分析数据包括两种: 理论离散数据(已知理论模型的离散数据); 带噪声的离散数据(在已知理论模型的离散数据中加入高斯噪声)。最后给出具体重构实例: 采用本文提出的改进重构法重构实际离散数据(未知其理论 CAD 模型, 从实际点云数据中获取)。

在重构之前, 三种方法均指定同一个初始分段点, 黄金分割法中的控制点收敛精度 $S_0 = 0.002$ mm。

图 6 为理论离散数据的重构。图 6a 为模拟数据的初始截面数据, 二维包围盒为 10×5 mm², 含 125 个数据点, 理论连接点为 $(1.000, 4.000)$; 图 6b 是三种重构法得到的结果; 图 6c 是局部放大图。其中, 由分步重构法得到的 B_1 曲线连接点 P_p^1 为 $(1.014, 4.056)$, 与理论连接点 P_l 距离误差为 0.057 mm; 由整体重构法得到的 B_2 曲线连接点 P_p^2 为 $(1.015, 4.056)$, 与理论连接点 P_l 距离误差为 0.058 mm; 由本文改进重构法得到的 B_3 曲线连接点 P_p^3 为 $(0.998, 3.992)$, 与理论连接点 P_l 距离误差为 0.009 mm。

图 6 理论离散数据的重构

表 2 中, 对比三种方法提取的实际连接点与理论连接点的距离误差 ε_d , 利用本文提出的改进重构法产生的距离误差要小得多; 从评价自由特征逼近精度的全部数据点的平均距离误差 ε_w 和最大距离误差 ε_m 来看, 改进重构法也要比其他两个方法精度高; 而且从平均距离误差 ε_l 和离散程度 σ_l 分析, 自由特征在连接点附近的数据点分布改进重构法更加均匀。可以看出, 本文提出的改进重构法能找寻到高精度的连接点, 从而提高了重构曲线的整体质量。

表 2 理论离散数据的重构结果分析

	提取的连接点 P_p	理论连接点 P_t	距离误差 ε_d	平均距离误差 ε_w	最大距离误差 ε_m	平均距离误差 ε_l	离散程度 σ_l
分步重构法	(1.014, 4.056)	(1.000, 4.000)	0.057	0.003	0.015	0.007	2.239×10^{-5}
整体重构法	(1.015, 4.056)	(1.000, 4.000)	0.058	0.001	0.004	0.001	1.425×10^{-6}
改进重构法	(0.998, 3.992)	(1.000, 4.000)	0.008	0.001	0.003	0.001	2.325×10^{-7}

图 7 是带噪声的离散数据重构,它是在图 6a 中的模拟数据加入了的高斯噪声。图 7a 为加入了 0.01 mm 高斯噪声的初始截面数据;图 7b 是由三种重构法得到的结果;图 7c 是局部放大图。其中,由分步重构法得到的 B_1 曲线连接点 P_p^1 为(1.014, 4.056),与理论连接点 P_t 距离误差为 0.057 mm;由整体重构法得到的 B_2 曲线连接点 P_p^2 为(1.015, 4.053),与理论连接点 P_t 距离误差为 0.055 mm;由本文改进重构法得到的 B_3 曲线连接点 P_p^3 为(0.999, 3.996),与理论连接点 P_t 距离误差为 0.004 mm。

表 3 中,对比三种方法提取的实际连接点与理论连接点的距离误差 ε_d ,利用本文提出的改进重构法产生的距离误差要小得多;从评价自由特征逼近

精度的全部数据点的平均距离误差 ε_w 和最大距离误差 ε_m 来看,本文的方法略逊于整体重构法,这是由于整体重构法的控制点数多于本文的控制点数。图 7c 中,结合平均距离误差 ε_l 和离散程度 σ_l ,改进重构法要比整体重构法均匀。可以看出,在具有噪声的情况下,本文提出的改进重构法优于另外两种方法。

图 8 为某叶片榫头部分截面数据中直线特征和自由特征的高精度重构。图 8a 为叶片榫头的截面数据,数据采集密度 $D \leq 0.03$ mm。图 8b 为叶片榫头离散数据的曲率信息图。图 8c 为曲率信息的局部放大图,根据此曲率信息图,很难将数据点 $A(1.054, 1.182)$,

图 7 带噪声的离散数据重构

图 8 某叶片榫头部分截面数据重构

表 3 带噪声的离散数据重构结果分析

mm

	提取的连接点 P_p	理论连接点 P_l	距离误差 ε_d	平均距离误差 ε_w	最大距离误差 ε_m	平均距离误差 ε_l	离散程度 σ_l
分步重构法	(1.014, 4.056)	(1.000, 4.000)	0.057	0.008	0.024	0.009	4.082×10^{-5}
整体重构法	(1.015, 4.053)	(1.000, 4.000)	0.055	0.005	0.018	0.005	8.628×10^{-6}
改进重构法	(0.999, 3.996)	(1.000, 4.000)	0.004	0.006	0.017	0.004	6.218×10^{-6}

点 $B(1.073, 1.188)$, 点 $C(1.092, 1.193)$, 点 $D(1.112, 1.198)$ 中最合适的点确定为分段点。而利用本文的方法, 则不必担心没有找到最合适的分段点, 只要确定理想连接点的大致区间为 $[A, D]$, 理想分段点的搜寻工作交给黄金分割法即可。图 8d 为本文方法重构的高精度截面图, 找寻的连接点 P_p 为 $(1.087, 1.192)$ 。

5 结论

本文提出了一种 G^1 连续的截面数据高精度重构方法, 其核心部分是利用黄金分割法动态搜寻直线特征和自由特征的最优连接点。

(1) 最优连接点搜索过程中, 只存在一重迭代, 算法简便而快捷。

(2) 由于连接点的高精度识别, 使得重构结果既严格满足了特征间的 G^1 连续性要求, 又保证了整个截面曲线对截面数据的逼近精度。

(3) 避免了如下问题: 由于分段点无法精确提取导致边界约束信息不准确, 进而使得重构结果不符合初始设计意图。

由于二维截面曲线还包括圆弧, 特征间还存在 G^2 连续, 在以后的工作中, 有必要继续研究, 才能使得截面数据的高精度重构更加系统化。

参 考 文 献

- [1] LIU G H, WONG Y S, ZHANG Y F, et al. Modeling cloud data for prototype manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 138: 53-59.
- [2] PARK H T, CHANG M H, PARK S C. A slicing algorithm of point cloud for rapid prototyping[C/CD]/Proceedings of the 2007 Summer Computer Simulation Conference, San Diego, California; 2007.
- [3] 任朴林, 周来水, 安鲁陵. 基于散乱数据截面线的曲面重构算法研究[J]. 中国制造业信息化, 2003, 32(3): 82-85. REN Pulin, ZHOU Laishui, AN Luling. A surface reconstruction algorithm based on planar contours of discrete data[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2003, 32(3): 82-85.
- [4] LIN H, CHEN W, WANG G. Curve reconstruction based on an interval B-spline curve[J]. Visual Comput., 2005, 21: 1-11.
- [5] JAVIDRAD F, POURMOAYED A. Contour curve reconstruction from cloud data for rapid prototypeing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27: 397-404.
- [6] BENKŐ P, KOS G, VARADY T, et al. Constrained fitting in reverse engineering[J]. Computer Aided Geometric Design, 2002, 19: 173-205.
- [7] IMANI B M, HASHEMIAN S A. NURBS-based profile reconstruction using constrain fitting techniques[J]. Journal of Mechanics, 2012, 28(3): 407-412.
- [8] KE Y L, ZHU W D, LIU F S, et al. Constrained fitting for 2D profile-based reverse modeling[J]. Computer-Aided Design, 2006, 38(2): 101-114.
- [9] 朱伟东. 反求工程中基于几何约束的模型重建理论及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. ZHU Weidong. Research on the theory and application of geometric constraint based model reconstruction in reverse engineering[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [10] 刘云峰. 基于截面特征的反求工程 CAD 建模关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004. LIU Yunfeng. Study on key modeling techniques based on section feature in reverse engineering[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [11] 刘云峰, 柯映林. 反求工程中切片数据处理及断面特征曲线全局优化技术[J]. 机械工程学报, 2006, 42(3): 124-129. LIU Yunfeng, KE Yinglin. Slicing data processing and global optimization of feature curve in reverse engineering[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(3): 124-129.
- [12] ZHANG X, ZHANG H B. Research on precise constraint reconstruction of section data[J]. Advanced Materials Research, 2013: 712-715.
- [13] LIU G H, WONG Y S, ZHANG Y F, et al. Adaptive fairing of digitized data points with discrete curvature[J]. Computer Aided Design, 2002, 34: 309-320.
- [14] PRATT V. Direct least-squares fitting of algebraic surfaces[J]. Compute & Graphics (SIGGRAPH87), 1987, 21(4): 145-152.

- [15] MA W Y, KRUTH J P. Parameterization of randomly measured points for least squares fitting of B-spline curves and surfaces[J]. Computer Aided Design, 1995, 27: 663-675.
- [16] 陈凯云, 谢晓琴. 节点矢量影响 NURBS 曲线的规律研究与应用[J]. 机械工程学报, 2008, 44(10): 294-299.
- CHEN Kaiyun, XIE Xiaoqin. Research on how the knot vector influences non-uniform rational B-spline curve

[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(10): 294-299.

作者简介: 章海波, 男, 1990 年出生。主要研究方向为逆向工程、CAD/CG。

E-mail: zhanghaibo0810@126.com

张旭(通信作者), 女, 1978 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。

主要研究方向为逆向工程、CAD/CG。

E-mail: zxu1116@126.com

国家自然科学基金委员会机械工程学科 2012/2013 年度结题项目简介

基于聚合物光致膨胀的 SED 显示器电子发射源纳米缝阵列制造工艺研究*

项目负责人: 邵金友(E-mail: jyshao@mail.xjtu.edu.cn)

依托单位: 西安交通大学

项目批准号: 51005178

1. 项目简介

表面传导电子发射显示器(SED)是液晶显示器和等离子显示器之后的下一代平板显示器候选技术之一, 电子发射源纳米缝阵列成形则是 SED 显示器面板的核心制造工艺。本项目基于聚合物的光致分解理论, 提出了采用紫外激光诱导薄膜定域膨胀开裂和激光大面积扫描的纳米缝阵列制造技术。将通过对激光脉冲作用下聚合物的膨胀行为和膨胀应变作用下电子发射薄膜材料的微观断裂机理的研究, 探索纳米缝结构的高效、可控成形工艺; 在此基础上探索纳米缝结构特征对电子发射特性的影响规律, 实现电子发射极的薄膜结构优化。另外, 在大面积纳米缝阵列制造过程中, 本项目跳出已有研究中控制纳米缝尺度或形状的思路, 采取直接控制隧道电流的方式以提高发射源阵列发射特性的一致性, 从而保证大面积像素的均匀显示。

2. 主要创新点及主要研究进展

纳米尺度间隙电极在新型传感器件、显示器件和生物电子器件等领域应用广泛, 然而纳米尺度间隙电极的高效低成本制造一直是制约此类器件发展的重要瓶颈: 一方面, 传统光学光刻技术受限于光学衍射波长已无法实现 100 nm 以下尺度纳米结构的制造, 另一方面, 即使采用浸没式深紫外光刻技术或电子束光刻技术等先进手段实现纳米尺度的特征结构制造, 纳米间隙电极的制造精度仍然受限于剥离工艺。为了解决这一难题, 建立大面积纳米间隙(<100 nm)平面电极阵列的制造工艺方法, 本项目利用聚合物激光光致膨胀精确可控的特性, 通过适当的结构设计, 在电子发射极的玻璃基材和电子发射薄膜之间引入聚合物层, 利用聚合物的激光光致分解膨胀效应为电子发射薄膜开裂提供所需的变形, 从而发展一种崭新的采用聚合物激光膨胀诱导的纳米缝制造技术。项目执行期间完成了约束空间内聚合物的激光光致膨胀特性及其可控性、聚合物表面电子发射薄膜的微观断裂机理及裂缝可控性和电子发射极纳米缝结构制造及结构特征对电子发射特性的影响规律等系列研究内容, 研究结果证实该技术可实现纳米间隙电极的高效可控制造。目前, 该纳米间隙电极制造技术已拓展应用于制造高灵敏度纳米传感器件。

* 此项目在“第十一届设计与制造前沿国际会议(ICFDM2014)”上作为候选项目推荐参加“国家自然科学基金委员会机械工程学科 2012/2013 年度优秀结题项目”的评选。