

陈思, 陈浩, 李寿涛. 一种工业 CT 点云数据的 NURBS 曲面重构算法[J]. CT 理论与应用研究, 2011, 20(1): 11-20.
Chen S, Chen H, Li ST. A kind of NURBS surface reconstruction method for industrial CT cloud data[J]. CT Theory and Applications, 2011, 20(1): 11-20.

一种工业 CT 点云数据的 NURBS 曲面重构算法

陈思[✉], 陈浩, 李寿涛

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 虽然 CT 技术已经发展得相当成熟, 但保证检测数据重构的精度还存在较大困难。本文将工业 CT 图像转化为三维散乱点云数据, 研究数据预处理算法; 对处理后数据进行 NURBS 曲面插值, 完成了对 NURBS 曲面的重构。以某工件工业 CT 图像为例, 通过 VG 软件转化为点云数据, 利用 VC++ 和 OpenGL 编程实现数据预处理算法和 NURBS 曲面拟合, 并用实例验证了该曲面造型方法的正确性。

关键词: 工业 CT; 点云; NURBS 曲面重构

文章编号: 1004-4140 (2011) 01-0011-010 **中图分类号:** 0242 **文献标识码:** A

基于工业 CT 的逆向技术是伴随着计算机科学技术、先进制造技术及精密测量技术发展而出现的, 是在无图纸或 CAD 模型的情况下, 利用工业 CT 扫描测量手段对现有实物进行扫描, 利用扫描得到的点云数据进行 CAD 建模, 从而复制出已有的产品^[1]。

目前, 重建产品原型的数字化模型研究主要集中在对测量数据曲面拟合方法的研究上。自由曲线曲面重构研究经历了: 1964 年孔斯 (Coons) 用四边界定义一块曲面片; 1971 年 Bezier 提出用多边形网格来描述复杂曲线曲面设计方法; 1972 年 Boor 给出了关于 B 样条的一套标准算法; 1974 年美国通用汽车公司的 Gordon 等提出了 B 样条曲线曲面造型的方法; 1975 年, 美国 Syracuse 大学的 Versprille 在其博士论文中提出了有理 B 样条方法, 该方法经过 Piegl 和 Tiller 等的深入研究, 提出并使得非均匀有理 B 样条 (Non-Uniform Rational B-Spline, NURBS) 在理论上和应用上走向成熟^[2-8]。由于 NURBS 方法的这些突出优点, 国际标准化组织 (ISO) 于 1991 年颁布了关于工业产品数据交换的 STEP 国际标准, 将 NURBS 方法作为定义工业产品几何形状的唯一数学描述方法, 从而使 NURBS 方法成为曲线曲面造型技术发展趋势中最重要的基础^[2]。目前, 国内不少高校和企业也对检测数据的重构算法做了大量研究: 北京隆源公司实现了将片层反求数据 (CT, CGI) 和激光扫描数据直接转换成 RP 加工的数据, 清华大学激光快速成型中心进行了照片反求和 CT 反求研究等。

国内外虽然在逆向工程设备和软件的研发上做了不少工作, 但直接针对工业 CT 测量数据的重构研究还不多, 且重构精度还不能完全保证, 本文将工业 CT 图像转化为点云数据, 应用 NURBS 曲线曲面理论形成了一套具有可行性的数据处理和曲面重构算法, 利用 NURBS 曲面控制点网格插值的方式拟合曲面, 减少拟合误差。

1 散乱点云数据处理

1.1 数据来源

本文数据来源为某型号工业 CT 扫描设备扫描所得图像, 利用 VG 软件选择合适的阈值, 提取图像轮廓线, 将图像数据转化为三维散乱点云数据, 数据特点为: 无序、散乱、量大。

1.2 数据预处理步骤

数据预处理是曲面重建的基础, 其目标是用较少的规则化数据点集最高精度地取代原始点云数据。数据的预处理关键在于分层、精简、平滑等处理顺序的设置。由图 1 流程可知, 先获取截面数据是预处理的首要步骤, 而后的精简和平滑都在截面数据(二维)基础上进行。

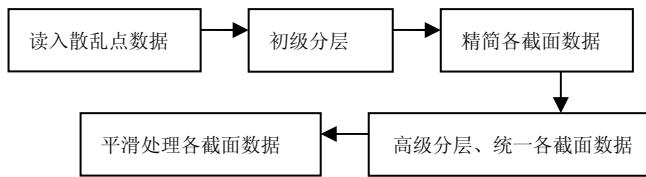


图 1 数据预处理步骤

Fig. 1 The step of data pre-processing

1.2.1 精简

由于各种人为和随机因素的影响, 点云中包含一定的噪声点, 约占数据总量的 0.1%~5%, 如果不在工序的开始阶段将其除去, 则会造成噪声的传播, 势必影响到后续曲面重构的质量。为保证精简后点云可以完整描述曲面形状信息, 本次设计对每层线性点云数据采用曲率精简法。曲率精简法步骤^[9-10]:

- 1) 求各点曲率, 计算算术平均值, 提取曲率大于平均值的点;
- 2) 将原始所有点依次排为数组 A, 将端点和曲率大的点放入数组 B 中, 记录在数组 A 中的序号;
- 3) 查询数组 B 中相应的原先数组 A 中的序号和其曲率, 保留序号连续且曲率大的点(特征点), 重新组成数组 B, 各点序号与数组 A 一致;
- 4) 查询数组 B 中各点序号间隔, 将其中最小间隔 L_{\min} 设为最小步长, 以自定义 L (最小值为 L_{\min}) 为步长向数组 B 中插入数值点(从数组 A 中取数据), 插值完毕将数据存入数组 C。注: L 越大, 点越少, 例如以 $L_{\min} + 1$ 为步长就是在保证不丢失特征点的基础上, 以 $L_{\min} + 1$ 为步长向数组 B 中插入数值点。

1.2.2 分层

因为本次设计数据为散乱点云数据, 所以必须对这些数据进行分层处理, 本文总结了一套分层处理方法, 步骤如下:

- 1) 读入文本文件;
- 2) 指定层数 L 及容许误差 ΔZ , 计算出数据点中最大 Z 坐标值 Z_{\max} 和最小 Z 坐标值

Z_{\min} ，控制误差 ΔZ 一般设为 0.001 mm，保证误差在 0.001 mm 内；

- 3) 将数据平均分层, 层距 $d = (Z_{\max} - Z_{\min}) / L$;
 - 4) 确定每层 Z 值, 设每层 Z 坐标大小为 Z_i , $Z_i = Z_{\min} + i \times d$, $i = 0, 1, \dots$;
 - 5) 与 Z 值之差在容许值误差内的值分为一层, 统一每层 Z 值; 其余不满足要求的点设为 0;
 - 6) 每层点排序 (依照 Z 值大小), 记录每层点数量、按每层点 X/Y 坐标大小从小到大排列。

1.2.3 统一截面点云算法

在基于 NURBS 原理的拟合中, 曲面插值重构必须在曲面分层后各层点数目相等的基础上进行计算, 所以在对散乱数据分层后还需对每层数据进行数据统一处理。

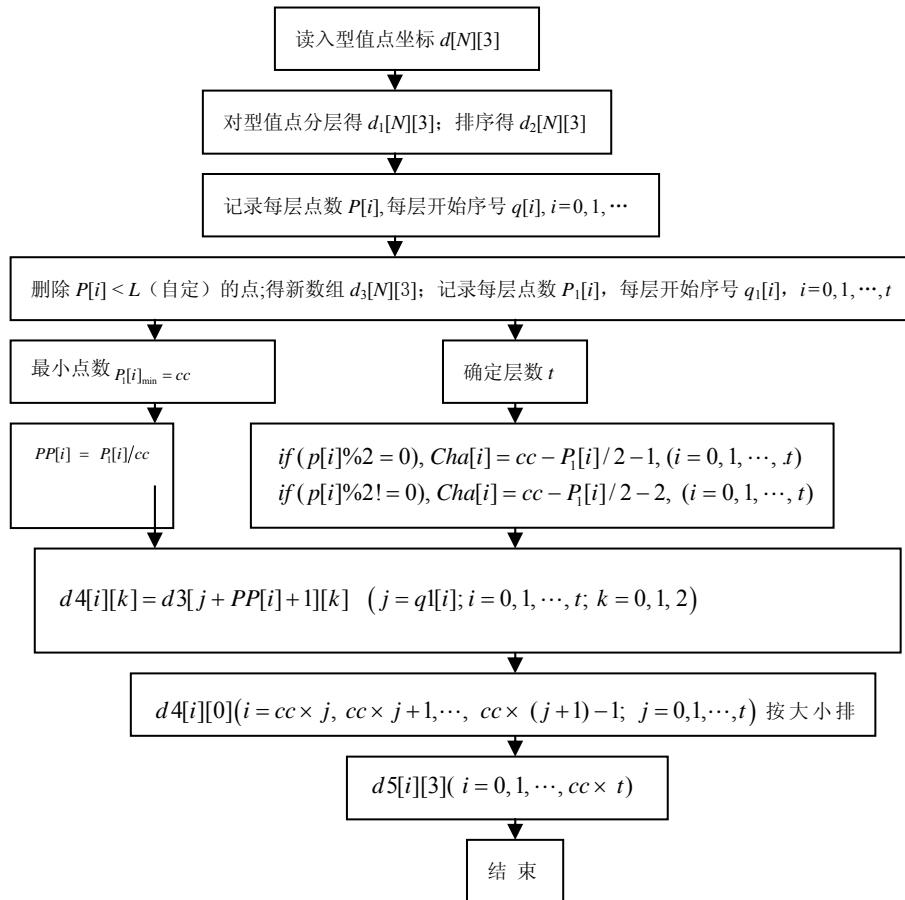


图 2 统一截面点云算法
Fig. 2 The algorithm of consolidating the data of each layer

流程简单说明：① 读入各点坐标值；② 依照坐标 Z 值大小排序；③ 计算每层点数，删除点数较小的层；④ 确定层数 M 及每层点数 N ；⑤ 统一每层点数；⑥ 排序。

1.2.4 平滑

移动平均滤波法算法简单, 不减少点云数量, 利用不同的权值可以调整平滑质量。用一定范围内相邻数据点的均值作为当前点的值, 相当于使用了低通滤波器。公式如下^[11]:

$$y_s = \frac{1}{2N+1} (y_{i+N} + y_{i+N-1} + \dots + y_{i-N})$$

$y_s(i)$ 是第 i 个数据点经光滑处理后的值, N 是在 $y_s(i)$ 每一边相邻数据点个数。

2 NURBS曲面重构

2.1 造型步骤

NURBS 方法的突出优点是: 可以精确地表示二次规则曲线曲面, 从而能用统一的数学形式表示规则曲线曲面与自由曲线曲面, 而其他非有理方法无法做到这一点。本文采用的 NURBS 曲面模型重构流程如图 3 所示, 有以下特点^[14]:

- 1) 权因子初设值为 1。
- 2) 对结构复杂的曲面进行分层计算时, 应减小分层厚度, 确保曲面信息完整。
- 3) 对每层点云进行分层时, 应保证每层点云数目一致。

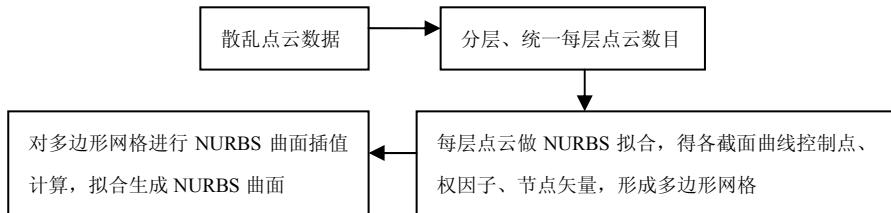


图 3 NURBS 模型重构流程图

Fig. 3 Process of NURBS surface reconstruction

2.2 NURBS曲面公式

双三次 NURBS 曲面, 由节点列 $\mathbf{U} = [u_0, u_1, u_2, \dots, u_{n+5}]$, 得到定义域内节点生成列 $\mathbf{DU} = \{\Delta_3^u, \Delta_4^u, \dots, \Delta_{n+1}^u\}$; 由节点列 $\mathbf{V} = [v_0, v_1, v_2, \dots, v_{m+5}]$ 得到节点列 $\mathbf{DV} = \{\Delta_3^v, \Delta_4^v, \dots, \Delta_{m+1}^v\}$ 。

对于 $u \in [u_{i+3}, u_{i+4}]$, $u = \frac{u - u_{i+3}}{u_{i+4} - u_{i+3}} = \frac{u - u_{i+3}}{\Delta_{i+3}^u}$; 对于 $v \in [v_{j+3}, v_{j+4}]$, 令 $v = \frac{v - v_{j+3}}{v_{j+4} - v_{j+3}} = \frac{v - v_{j+3}}{\Delta_{j+3}^v}$, 则双三次 NURBS 曲面可写为^[12-13]:

$$\mathbf{P}_{i,j}(u, v) = \frac{\mathbf{U} \mathbf{M}_{u,i} \mathbf{V}_{v,j} \mathbf{M}_{v,j}^T \mathbf{V}^T}{\mathbf{U} \mathbf{M}_{u,i} \mathbf{W}_{i,j} \mathbf{M}_{v,j}^T \mathbf{V}^T} \quad (0 \leq u \leq 1; 0 \leq v \leq 1; i, j = 0, 1, 2, \dots, n-1) \quad (1)$$

其中: $\mathbf{P}_{i,j}(u, v)$ 为 NURBS 曲面上点的坐标, 下标 i, j 分别对应曲面 u 向、 v 向上相应点;

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} 1 & \mathbf{u} & \mathbf{u}^2 & \mathbf{u}^3 \end{pmatrix} \quad \mathbf{V}^T = \begin{pmatrix} 1 & \mathbf{v} & \mathbf{v}^2 & \mathbf{v}^3 \end{pmatrix}^T$$

$$\mathbf{M}_{u,i} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(\Delta_{i+3})^2}{\Delta_{i+2}^2 \Delta_{i+1}^3} & (1 - m_{11} - m_{13}) & \frac{(\Delta_{i+3})^2}{\Delta_{i+2}^3 \Delta_{i+2}^2} & 0 \\ -3m_{11} & (3m_{11} - m_{23}) & \frac{3\Delta_{i+2}\Delta_{i+3}}{\Delta_{i+2}^3 \Delta_{i+2}^2} & 0 \\ 3m_{11} & -(3m_{11} + m_{33}) & \frac{3(\Delta_{i+3})^2}{\Delta_{i+2}^3 \Delta_{i+2}^2} & 0 \\ -m_{11} & (m_{11} - m_{43} - m_{44}) & -\left(\frac{1}{3}m_{33} + m_{44} + \frac{(\Delta_{i+3})^2}{\Delta_{i+3}^2 \Delta_{i+2}^3}\right) & \frac{(\Delta_{i+3})^2}{\Delta_{i+3}^3 \Delta_{i+3}^2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{w,j} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(\Delta_{j+3})^2}{\Delta_{j+2}^2 \Delta_{j+1}^3} & (1 - m_{11} - m_{13}) & \frac{(\Delta_{j+3})^2}{\Delta_{j+2}^3 \Delta_{j+2}^2} & 0 \\ -3m_{11} & (3m_{11} - m_{23}) & \frac{3\Delta_{j+2}\Delta_{j+3}}{\Delta_{j+2}^3 \Delta_{j+2}^2} & 0 \\ 3m_{11} & -(3m_{11} + m_{33}) & \frac{3(\Delta_{j+3})^2}{\Delta_{j+2}^3 \Delta_{j+2}^2} & 0 \\ -m_{11} & (m_{11} - m_{43} - m_{44}) & -\left(\frac{1}{3}m_{33} + m_{44} + \frac{(\Delta_{j+3})^2}{\Delta_{j+3}^2 \Delta_{j+2}^3}\right) & \frac{(\Delta_{j+3})^2}{\Delta_{j+3}^3 \Delta_{j+3}^2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{W}_{i,j} = \begin{bmatrix} w_{i,j} & w_{i,j+1} & w_{i,j+2} & w_{i,j+3} \\ w_{i+1,j} & w_{i+1,j+1} & w_{i+1,j+2} & w_{i+1,j+3} \\ w_{i+2,j} & w_{i+2,j+1} & w_{i+2,j+2} & w_{i+2,j+3} \\ w_{i+3,j} & w_{i+3,j+1} & w_{i+3,j+2} & w_{i+3,j+3} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{V}_{w,ij} = \begin{bmatrix} w_{i,j}V_{i,j} & w_{i,j+1}V_{i,j+1} & w_{i,j+2}V_{i,j+2} & w_{i,j+3}V_{i,j+3} \\ w_{i+1,j}V_{i+1,j} & w_{i+1,j+1}V_{i+1,j+1} & w_{i+1,j+2}V_{i+1,j+2} & w_{i+1,j+3}V_{i+1,j+3} \\ w_{i+2,j}V_{i+2,j} & w_{i+2,j+1}V_{i+2,j+1} & w_{i+2,j+2}V_{i+2,j+2} & w_{i+2,j+3}V_{i+2,j+3} \\ w_{i+3,j}V_{i+3,j} & w_{i+3,j+1}V_{i+3,j+1} & w_{i+3,j+2}V_{i+3,j+2} & w_{i+3,j+3}V_{i+3,j+3} \end{bmatrix}$$

2.2.1 三次NURBS空间曲面节点矢量的确定

本文采用累积弦长参数法, 则三次 NURBS 曲线的节点矢量^[12]为:

$$\begin{aligned}
\mathbf{U} = & \left(u_0 = u_1 = u_2 = u_3 = 0, \frac{\mathbf{P}_{0,j}\mathbf{P}_{1,j}}{S_U}, \frac{\mathbf{P}_{0,j}\mathbf{P}_{1,j} + \mathbf{P}_{1,j}\mathbf{P}_{2,j}}{S_U}, \frac{\mathbf{P}_{0,j}\mathbf{P}_{1,j} + \mathbf{P}_{1,j}\mathbf{P}_{2,j} + \mathbf{P}_{2,j}\mathbf{P}_{3,j}}{S_U}, \right. \\
& \left. \dots, \frac{\mathbf{P}_{0,j}\mathbf{P}_{1,j} + \mathbf{P}_{1,j}\mathbf{P}_{2,j} + \dots + \mathbf{P}_{n-3,j}\mathbf{P}_{n-2,j}}{S_U}, u_{n+2} = u_{n+3} = u_{n+4} = u_{n+5} = 1 \right) \\
(2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{V} = & \left(v_0 = v_1 = v_2 = v_3 = 0, \frac{\mathbf{P}_{i,0}\mathbf{P}_{i,1}}{S_V}, \frac{\mathbf{P}_{i,0}\mathbf{P}_{i,1} + \mathbf{P}_{i,1}\mathbf{P}_{i,2}}{S_V}, \frac{\mathbf{P}_{i,0}\mathbf{P}_{i,1} + \mathbf{P}_{i,1}\mathbf{P}_{i,2} + \mathbf{P}_{i,2}\mathbf{P}_{i,3}}{S_V} \right. \\
& \left. \dots, \frac{\mathbf{P}_{i,0}\mathbf{P}_{i,1} + \mathbf{P}_{i,1}\mathbf{P}_{i,2} + \dots + \mathbf{P}_{i,n-3}\mathbf{P}_{i,n-2}}{S_V}, v_{n+2} = v_{n+3} = v_{n+4} = v_{n+5} = 1 \right)
\end{aligned}$$

式中, $\mathbf{P}_{i,j}$ ($i = 0, 1, 2, \dots, n-1$; $j = 0, 1, 2, \dots, n-1$) 为型值点, n 为型值点数, S_U 为 u 向各点连线弦长折线总长, S_V 为 v 向各点连线弦长折线总长, 即:

$$S = \sum_{i=0}^{n-2} \mathbf{P}_{i,j} \mathbf{P}_{i+1,j} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n-1; j = 0, 1, 2, \dots, n-1)$$

2.2.2 反算三次NURBS空间曲面的控制顶点

已知 n 个型值点 $\mathbf{P}_{i,j}$ ($i = 0, 1, 2, \dots, n-1$; $j = 0, 1, 2, \dots, n-1$), 根据插值要求有:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{i,0}(0) = \mathbf{P}_{i,0}, \mathbf{P}_{0,j}(0) = \mathbf{P}_{0,j} \\ \mathbf{P}_{i,j}(1) = \mathbf{P}_{i+1,j}(0) = \mathbf{P}_{i+1,j} \\ \mathbf{P}_{n-2,j}(1) = \mathbf{P}_{n-1,j}, \mathbf{P}_{i,n-2}(1) = \mathbf{P}_{i,n-1} \end{cases} \quad (i, j = 0, 1, 2, \dots, n-3)$$

由于:

$$\begin{aligned}
[1 \ 0 \ 0 \ 0] \cdot \mathbf{M}_{u,i} &= \left(\frac{(\Delta_{i+3})^2}{\Delta_{i+2}^2 \Delta_{i+1}^3} \ 1 - \frac{(\Delta_{i+3})^2}{\Delta_{i+2}^2 \Delta_{i+1}^3} - \frac{(\Delta_{i+2})^2}{\Delta_{i+2}^3 \Delta_{i+2}^2} \ \frac{(\Delta_{i+2})^2}{\Delta_{i+2}^3 \Delta_{i+2}^2} \ 0 \right) \\
[1 \ 0 \ 0 \ 0] \cdot \mathbf{M}_{v,j} &= \left(\frac{(\Delta_{j+3})^2}{\Delta_{j+2}^2 \Delta_{j+1}^3} \ 1 - \frac{(\Delta_{j+3})^2}{\Delta_{j+2}^2 \Delta_{j+1}^3} - \frac{(\Delta_{j+2})^2}{\Delta_{j+2}^3 \Delta_{j+2}^2} \ \frac{(\Delta_{j+2})^2}{\Delta_{j+2}^3 \Delta_{j+2}^2} \ 0 \right)
\end{aligned}$$

为方便计算, 以下的 $\mathbf{P}_{i,j}(0)$ 记为 $\mathbf{P}_{i,j}$, 故令:

$$a_{i,j} = \frac{(\Delta_{i+3})^2}{\Delta_{i+2}^2 \Delta_{i+1}^3} w_{i,j}, \quad b_{i,j} = \left(1 - \frac{(\Delta_{i+3})^2}{\Delta_{i+2}^2 \Delta_{i+1}^3} - \frac{(\Delta_{i+2})^2}{\Delta_{i+2}^3 \Delta_{i+2}^2} \right) w_{i+1,j}, \quad c_{i,j} = \frac{(\Delta_{i+2})^2}{\Delta_{i+2}^3 \Delta_{i+2}^2} w_{i+2,j}$$

可得:

$$a_{i,j} \mathbf{V}_{i,j} + b_{i,j} \mathbf{V}_{i+1,j} + c_{i,j} \mathbf{V}_{i+2,j} = (a_{i,j} + b_{i,j} + c_{i,j}) \mathbf{P}_{i,j} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n-2)$$

由于有 n 个方程, $n+2$ 个未知数, 因此需要补充 2 个方程。本文重点讨论自由端点条件时控制点求法。自由端点条件下, 首、末两端点的二阶导矢为零, 根据 NURBS 曲线的插值特性, 对其矩阵表示形式求导, 可得边界条件:

$$\mathbf{P}_{0,j} = \mathbf{V}_{0,j}, \mathbf{P}_{i,0} = \mathbf{V}_{i,0}, \mathbf{P}_{n-1,j} = \mathbf{V}_{n+1,j}, \mathbf{P}_{i,n-1} = \mathbf{V}_{i,n+1}, \mathbf{P}_{0,j}'' = 0, \mathbf{P}_{i,0}'' = 0, \mathbf{P}_{n-1,j}'' = 0, \mathbf{P}_{i,n-1}'' = 0$$

代入公式 (1) 得:

首端:

$$\begin{aligned} & \left(2 - \frac{3w_{1,j}}{w_{0,j}} - \frac{u_4}{u_5} \right) w_{1,j} \mathbf{V}_{1,j} + \frac{u_4}{u_5} w_{2,j} \mathbf{V}_{2,j} = \\ & \left(\left(2 - \frac{3w_{1,j}}{w_{0,j}} \right) w_{1,j} + (w_{2,j} - w_{1,j}) \frac{u_4}{u_5} \right) \mathbf{P}_{0,j} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n-2) \end{aligned}$$

末端:

$$\begin{aligned} & \left(2 - \frac{3w_{n,j}}{w_{n+1,j}} - \frac{1-u_{n+1}}{1-u_n} \right) w_{n,j} \mathbf{V}_n + \frac{1-u_{n+1}}{1-u_n} w_{n-1,j} \mathbf{V}_{n-1} = \\ & \left(\left(2 - \frac{3w_{n,j}}{w_{n+1,j}} \right) w_{n,j} + (w_{n-1,j} - w_{n,j}) \frac{1-u_{n+1}}{1-u_n} \right) \mathbf{P}_{n-1,j} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n-2) \end{aligned}$$

令:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_i = \left(2 - \frac{3w_{1,j}}{w_{0,j}} - \frac{u_4}{u_5} \right) w_{1,j} \\ B_i = \frac{u_4}{u_5} w_{2,j} \\ C_i = \left(2 - \frac{3w_{1,j}}{w_{0,j}} \right) w_{1,j} + (w_{2,j} - w_{1,j}) \frac{u_4}{u_5} \\ D_i = \left(2 - \frac{3w_{n,j}}{w_{n+1,j}} - \frac{1-u_{n+1}}{1-u_n} \right) w_{n,j} \\ E_i = \left(\frac{1-u_{n+1}}{1-u_n} \right) w_{n-1,j} \\ F_i = \left(2 - \frac{3w_{n,j}}{w_{n+1,j}} \right) w_{n,j} + (w_{n-1,j} - w_{n,j}) \left(\frac{1-u_{n+1}}{1-u_n} \right) \\ (i, j = 1, 2, \dots, n-2) \end{array} \right.$$

求解式为:

$$\begin{bmatrix} A_i & B_i \\ a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ \dots & \dots \\ a_{n-3} & b_{n-3} & c_{n-3} \\ a_{n-2} & b_{n-2} & c_{n-2} \\ D_i & E_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{1,j} \\ \mathbf{V}_{2,j} \\ \mathbf{V}_{3,j} \\ \dots \\ \mathbf{V}_{n-2,j} \\ \mathbf{V}_{n-1,j} \\ \mathbf{V}_{n,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_i \mathbf{P}_{0,j} \\ \mathbf{P}_{1,j} \\ \mathbf{P}_{2,j} \\ \dots \\ \mathbf{P}_{n-3,j} \\ \mathbf{P}_{n-2,j} \\ F_i \mathbf{P}_{n-1,j} \end{bmatrix} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n-2) \quad (3)$$

其首端顶点 $\mathbf{V}_{0,j} = \mathbf{P}_{0,j}$ ，末端顶点 $\mathbf{V}_{n+1,j} = \mathbf{P}_{n-1,j}$ ，解方程组 (3) 可求得 $\mathbf{V}_{1,j}, \mathbf{V}_{2,j}, \dots, \mathbf{V}_{n,j}$ ，即得全部顶点。

2.3 NURBS 曲面插值

由 NURBS 曲面方程式 (1) 插值可得曲面上任意点的坐标，其中，对 u 向或 v 向的均匀插值可用于计算曲面加工轨迹。 u 向或 v 向的均匀插值可将曲面划分成均匀等份，引入插值参数 E 、 F ，等份数量用参数 E 、 F 表示 (E 为 u 向型值点每两点间等分份数、 F 为 v 向型值点每两点间等分份数)。

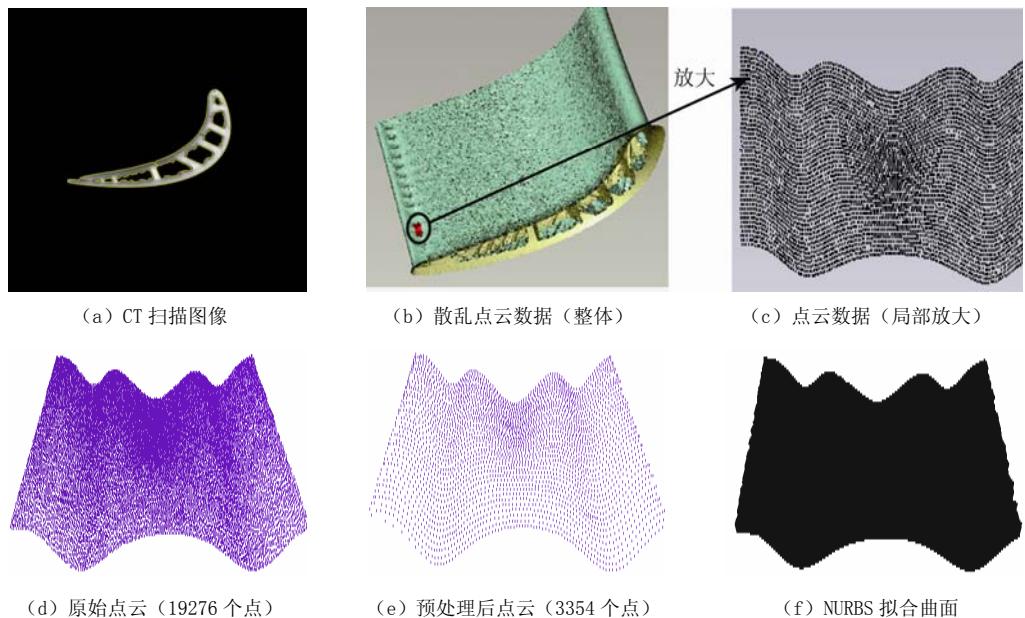


图 4 工业 CT 点云数据曲面重构实例

Fig. 4 The illustrations of surface reconstruction based on CT data

插值计算方法如下：

- 1) 沿 u (或 v) 向求出给定型值点 P_{ij} 相应的控制顶点 (式 3);
- 2) 将已求得的控制顶点作为新的型值点，计算得到 NURBS 曲面新的控制顶点；
- 3) 设 (1) 式中

$$\begin{cases} u = \frac{e}{E} & e = (0, 1, 2, \dots, E) \\ v = \frac{f}{F} & f = (0, 1, 2, \dots, F) \end{cases} \quad (4)$$

插值时, 将 (4) 式中 u 、 v 值依次带入式 (1) 计算出新的插值点 P_{ij} 。

3 实例

如图 4 所示, 图 4 (a) 为某型号叶片的 CT 扫描图像; 图 4 (b) 为利用 VG 软件将图像格式转化为三维散乱点云数据格式后成效图; 图 4 (c) 将图 4 (b) 中整体数据取一部分点云数据用于 NURBS 曲面重构验证; 图 4(d) 到图 4(f) 为本文提出的散乱点云预处理和 NURBS 曲面重构算法的结果。由实例可知, 本文提供的算法可有效提取工业 CT 图像表面数据信息并完成其 NURBS 曲面重构。

4 总结与展望

通过对工业 CT 扫描图像转化得到的散乱点云数据进行处理算法研究, 得到 NURBS 曲面重构算法, 包括: 散乱点云数据的预处理算法 (分层、精简、统一各截面点云数目、平滑)、NURBS 曲线曲面的拟合、NURBS 曲面插值, 最后利用 VC++ 和 OpenGL 编程实现算法。以某零件工业 CT 图像处理为例, 通过实例验证了该曲面造型方法的正确性。本文的创新性在于研究基于工业 CT 点云数据预处理和曲面重构算法, 结合实例验证了算法的可行性, 为工件的 CAD 建模或数控加工研究提供了数据基础。

参考文献

- [1] 施法中. 计算机辅助设计与非均匀有理 B 样条 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994: 443-465.
Shi FZ. Computer aid design and non-uniform rational B-spline [M]. Beijing: Beijing Aerospace University Publishing House, 1994: 443-465.
- [2] 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 5-7.
Zhu XX. Technology of sculptured curve and surface reconstruction [M]. Beijing: Science Publishing House, 2000: 5-7.
- [3] de Boor C. On calculation with B-spline [J]. Journal of Approximation Theory. 1972, 16(6): 50-62.
- [4] Piegl. On NURBS: A survey [J]. IEEE CG & A, 1991, 1(1): 3-10.
- [5] Versprille KJ. Computer-aided design applications of the rational B-spline approximation form [D]. Syracuse University, 1975: 56-59.
- [6] Gordon WJ, Riesenfeld RF. B-spline curves and surfaces [M]. Computer-Aided Geometric Design. New York: Academic Press, 1974: 110-112.
- [7] Cox MG. The numerical evaluation of B-spline [J]. Report No. National Physical Laboratory, 1971, 20(5): 205-108.
- [8] Riesenfeld RF. Non-uniform B-spline curves [C]. Proceedings of Second USA-JAPAN Computer Conference, AFIPS, 1975: 551-555.
- [9] 黄河清. NURBS 曲面逆向造型关键算法的研究与应用 [D]. 西安: 西北工业大学, 2009: 2-3.

- Huang HQ. The study and application on the key algorithm of NURBS surfaces modeling[D]. Xian: Northwest Polytechnical University, 2009: 2-3.
- [10] 李淑娟. 复杂零件的反求数据分析方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006: 9-10.
- Li SJ. A study of reserves data analysis method for complex part[D]. Xian: Xian University of technology, 2006: 9-10.
- [11] 王胜玉. 自由曲面重构关键技术的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008: 22-24.
- Wang SY. The research on the key technologies of free surface reconstruction[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2008: 22-24.
- [12] 董云风. 基于NURBS曲面的逼近及数控加工技术的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2000: 16-19.
- Dong YF. Research on approaching and NC machining technology based on NURBS surfaces[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2000: 16-19.
- [13] 陈思, 高雪霞, 丁国富, 等. NURBS曲面插值参数化及其在数控加工中的应用[J]. 机械设计与制造, 2010, 6(7): 57-59.
- Chen S, Gao XX, Ding GF, et al. Parameters-interpolating of NURBS surface and application in the NC machining[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2010, 6(7): 57-59.

A Kind of NURBS Surface Reconstruction Method for Industrial CT Cloud Data

CHEN Si[✉], CHEN Hao, LI Shou-tao

(Institute of Applied Electronics of Chinese Academy of Engineering Physics)

Abstract: Though CT technique has been developed for more than forty years, there are many difficulties in ensuring precision of surface reconstruction. For the Scattered Points from industrial CT image, a data pre-processing is implemented. After the process of extracting datapoint, the algorithms of fitting, interpolation and approximation is presented. Taking example for the scatter points which translate from CT image of a part by VG, the data pre-processing and approaching algorithm are implemented with VC++ and OpenGL software. The approach is proved to be correct by the example.

Key words: industrial CT; scattered points; NURBS surface reconstruction

作者简介: 陈思[✉] (1983—), 女, 2010 年获得西南交通大学硕士学位, 目前就职于中国工程物理研究院应用电子学研究所, 主要从事 CT 成像数学算法及工程应用、数据逆向工程处理等方面的研究, Tel: 18780540015, E-mail: elly_1027@yahoo.cn。