

基于 NURBS 曲线拟合的 STL 文件 局部精度提高方法的研究

李 成¹, 杨继全¹, 李 超², 徐路钊¹

(1. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

(2. 南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 三维打印成型中常用的 STL 模型的数据描述通常与 CAD 模型及其原型间存在一定程度的误差. 为了获得较好的三维打印效果, 提出了一种基于 NURBS 样条曲线局部轮廓拟合重构技术, 并利用自研的三维打印设备进行成型验证, 证明了方法的可行性, 获得了具有更好平滑度和更高精度的成型件.

[关键词] 快速成型, STL 文件, NURBS 曲线, 曲线拟合

[中图分类号] TH162+.1 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2013)01-0015-05

Approach on STL Files Accuracy Improving Partially Based on NURBS Curve Fitting

Li Cheng¹, Yang Jiquan¹, Li Chao², Xu Luzhao¹

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

(2. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: Compared with the CAD model and the prototype, there are a certain degree of errors in STL files, which are generally used for the description of model date in 3D printing. In order to get a better three-dimensional printing effect, this paper suggests a profile reconstruction technique based on the NURBS curve fitting, and uses the self-development printer to do molding authentication, which gets the prototype with better smoothness and higher accuracy.

Key words: rapid prototyping, STL file, NURBS curve, curve fitting

快速成型 RP(Rapid Prototyping)技术是将 CAD/CAM 技术、计算机数控技术、精密伺服驱动、激光技术和材料科学等先进技术集于一体的新技术,其原理区别于传统去除材料加工技术,采用分层制造,逐层叠加的加工方法,实现高效、低耗、智能化的生产,被认为是制造领域的又一次革命^[1,2]. STL 文件作为 CAD 系统与 RP 系统之间的交换接口一直存在很多不足. 原实体中所有的曲面均被三角形面片所取代,因而相对实体模型而言,STL 模型的精度较低,若要提高精度,则要增加三角面片的数量,这样文件的数据量就大大增加,STL 文件精度与数据量是一对矛盾,至今还没有得到很好地解决;此外,STL 缺少面片间的拓扑信息,还会有裂缝、间隙、面片重叠和法向反转的问题^[3,4]. 对加工制造以及成型精度都带来了一定的影响.

为了获得较高的加工效率以及较好的加工精度,不少学者对 STL 文件提出了优化处理意见:平雪良等^[5]提出了通过对弦高进行优化以控制模型误差的方法,在保证 CAD 模型精度的同时,提高了成形效率;杨光等^[6]提出了基于标准模板库 set 容器的拓扑关系重建算法及快速切片算法,有效去除 STL 文件的大量冗余数据,简化了数据存储,提高了加工效率;董涛等^[7]提出了对 STL 切片轮廓进行最优双圆弧重构的技术,加工出具有更高成形精度、表面光滑度的成型件.

本文在分析 STL 几何误差的基础上,提出一种局部细化三角面片并对带自由曲线的切片轮廓进行 NURBS 曲线拟合的精度提高的方法,兼顾模型转换精度与数据量的不同要求,从 CAD 系统中获得 STL 模型

收稿日期:2012-11-22.

基金项目:国家自然科学基金(61273243).

通讯联系人:杨继全,博士,副教授,研究方向:快速成型. E-mail:jiquany@126.com

之后,根据零件不同部分的精度要求.对带有自由曲线的轮廓截面进行 NURBS 曲线拟合,从而提高模型非平面部分的成型精度,并利用课题组开发的 FDM 工艺成型机进行实验验证.具体流程如图 1 所示.

1 STL 误差分析

由于从 CAD 模型向 STL 模型转换时,模型所有的面都用三角形平面表示,难免有失真,存在一定的几何误差,如图 2 所示,用曲率半径为 R 的圆弧来表示原实体横切面的一段,线段 AB 为 STL 模型在同一截面上两轮廓点的连线,线段 CE 即为该 STL 文件的逼近误差 $e=R-R\cos\alpha=R(1-\cos\alpha)$,可见如果采用较少的三角面片来表示自由曲面,则造成的逼近误差必定很大.

从图 2 可以看出如果在圆弧 AB 间再细化出若干三角面片,则逼近误差明显减少,但是文件的大小也成了几何倍数的增长,对后续的数据处理带来很多不便,甚至造成无法处理.以一个简单的圆柱零件为例,在三维造型软件 Pro/e 中通过设计弦高来改变三角面片的数量,不同弦高情况下三角面片化结果如图 3 所示,其三角面片及文件大小如表 1 所示.

表 1 不同弦高导出 STL 文件对比

弦高	三角面片数	数据大小/byte	误差
0.22	76	3 760	0.100
0.05	156	7 696	0.008

可见,STL 文件精度与数据数量是一对矛盾,并且一直没有得到很好的解决.

2 局部精度提高方法

对于包含自由曲面的模型而言,曲面部分应比平面部分的转换精度要求高;曲率较小的曲面应比曲率较大的曲面转换精度要求高;法向矢量与成型方向夹角较大的曲面部分应比夹角较小的曲面部分的转换精度要求高.在这样的情形下,有必要根据 STL 模型的不同位置

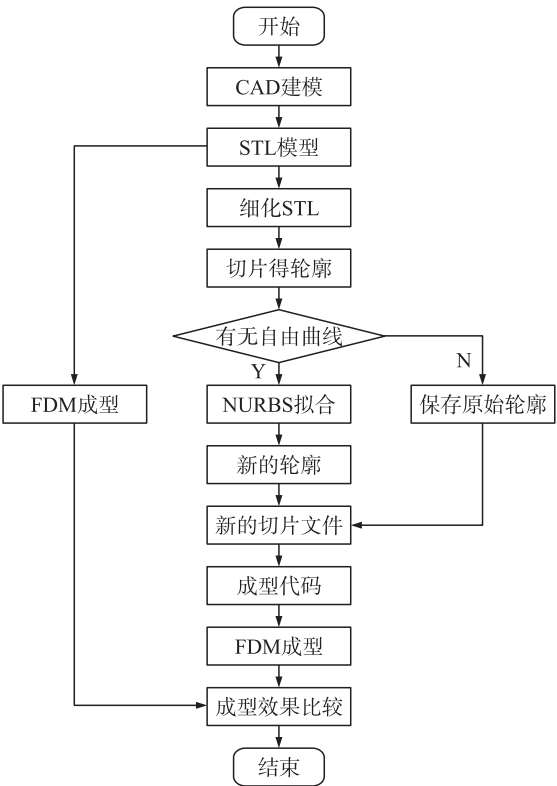


图 1 整体流程图
Fig. 1 Overall flow chart

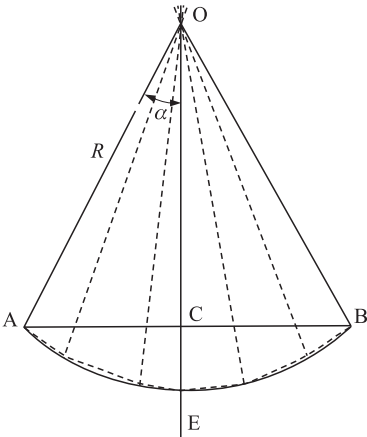


图 2 STL 误差分析图
Fig. 2 Analysis of STL errors



图 3 3 种不同状态下的同一个三维模型
Fig. 3 There different states of the same 3D model

的精度问题进行局部的三角面片细化,李震等^[8]提出了一种局部产生四面体,用新生成的三角面片代替原有的三角面片,提高局部精度的同时兼顾了文件大小,获得了不错的成效.本文在采用这种方法的基础上,对带有自由曲线的截面轮廓进行 NURBS 曲线拟合.局部三角面片细化的方法在文献[8]中已经做了详细的介绍,这里不再赘述,本文主要论述对带有自由曲线的截面轮廓进行 NURBS 曲线拟合的过程.

2.1 待拟合轮廓点获取

STL 格式文件经过切片后会得到一系列的轮廓型值点, $P_i (i=0, 1, \dots, m)$ 在进行曲线拟合之前,必须对切片所得的轮廓进行预处理,判定轮廓中是否存在自由曲线,以确定需要进行曲线拟合的轮廓.本文采用角度判断准则与长度判断准则来进行轮廓判断.具体方法如下:对每一层轮廓点进行如下处理,读入一数据点作为轮廓起点 P_0 ,沿逆时针方向寻找第 2 个点 P_1 ,构建线段 P_0P_1 ,同理构造 P_1P_2 ,计算两线段的夹角 θ ,若 θ 满足下式:

$$\theta = \frac{n\pi}{2}, \quad n=0, 1, \dots, m. \quad (1)$$

则说明两线段垂直或共线,不需要对其进行曲线拟合,当出现 $P_{i-1}P_i$ 和 P_iP_{i+1} 的夹角不满足式(1)时,则说明两线段成一定角度存在,考虑到三维模型平面与平面相交并呈现一定角度存在的关系,并不能说明这些点就是构成曲线的点,需要对其进行拟合处理.在进行完线段夹角判断的前提下,还要进行长度判断.进行长度判断时必须先给定一个长度阈值 σ ,该阈值可根据初始生成 STL 格式文件时设置的弦高选取.若 $|P_{i-1}P_i|$ 以及 $|P_iP_{i+1}|$ 均满足下式:

$$|P_iP_{i+1}| < \sigma, \quad (2)$$

则将 P_i 标记为 C_1 ,作为曲线拟合的起点.继续按照原有的方向寻找,同时进行夹角以及长度判定,标记一系列待拟合点 C_2, \dots, C_f ,当出现 $C_{f-1}C_f$ 与 C_fC_{f+1} 的夹角再次出现满足式(1)或者不满足式(2)的情况时,则确定 C_f 为该段曲线拟合的终点.根据上述叙述,得出结论,仅当曲线同时不满足式(1)以及式(2)的时候,才对构成连线段的若干点进行 NURBS 曲线拟合处理.其余情况均保留原有轮廓边界.

切片文件经过上述处理后会得到一系列分段待逼近拟合的型值点, $C_i (i=0, 1, \dots, f)$, 现在的问题就变成构造曲线对这些确定的型值点进行逼近拟合,以获得平滑的曲线.

2.2 NURBS 曲线拟合

NURBS 曲线是一种具有强大形状控制能力的参数曲线,已被 ISO 确定为自由型零件、产品几何表达的唯一形式^[9].采用 NURBS 曲线拟合时,若权重选择不当则容易产生较大的非线性误差,因此大多数研究者在进行 NURBS 曲线拟合时约定将权重设为 1^[10].本文也规定各点的权重为 1,则曲线多项式满足下式:

$$r(u) = \sum_{i=0}^n V_i N_{i,k}(u), \quad (3)$$

其中, $V_i (i=0, \dots, n)$ 为 NURBS 曲线的控制多边形顶点,一旦由型值点坐标获得了控制曲线几何形态的多边形顶点,曲线便随之确认. $N_{i,k}(u)$ 为定义在节点矢量 $U (U = \{u_0, u_1, \dots, u_{n+k+1}\})$ 上的第 i 个 k 次 B 样条基函数.可以由 de Boor-考克斯递推公式(4)、(5)所确定.

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}, \quad (4)$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u). \quad (5)$$

并且拟合得到的曲线应当满足误差 $\varepsilon(r, t)$ 达到最小,拟合误差可表示为:

$$\varepsilon(r, u) = \sum_{i=0}^m \|P_i - r(u_i)\|, \quad (6)$$

其中, $u_i (i=0, 1, \dots, f)$ 为节点矢量 U 采用准均匀分布.将两端点的重复度取为 $k+1$,内节点均匀分布,由用户输入控制多边形顶点个数 $n+1$ 及曲线次数 k ,则可利用下式,确定节点矢量.

$$\begin{aligned} u_0 &= u_1 = \dots = u_k = 0, \\ u_{k+i} &= \frac{1}{n-k} i; i=1, \dots, n-k, \\ u_{n+1} &= u_{n+2} = \dots = u_{n+1+k} = 1. \end{aligned} \quad (7)$$

由插值条件可得：

$$\begin{bmatrix} N_{0,k(u_0)} & \cdots & N_{n,k(u_0)} \\ N_{0,k(u_1)} & \cdots & N_{n,k(u_1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{0,k(u_f)} & \cdots & N_{n,k(u_f)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_0 C_0 \\ w_1 C_1 \\ \vdots \\ w_f C_f \end{bmatrix}.$$

(8)

为方便运算,之前已约定权重均为 1,因此上式可简记为 $TV=C$,显然在该线性系统中存在 n 个未知量, f 个约束条件. 由于拟合型值点的个数不确定性,因而方程无定解,可通过最小二乘原理求的其最小二乘解确定曲线多边形控制顶点 V :

$$V=(T^T T)^{-1} T^T C.$$

(9)

NURBS 曲线的多边形控制顶点确定后,逼近型值点的曲线便随之确定,新的切片轮廓也随之生成. 自行设计一带有自由曲面的三维模型,对其进行 STL 转换,并对曲面部分进行局部细化. 模型原图、STL 模型以及细化后的 STL 模型分别如图 4 ~ 图 6 所示.

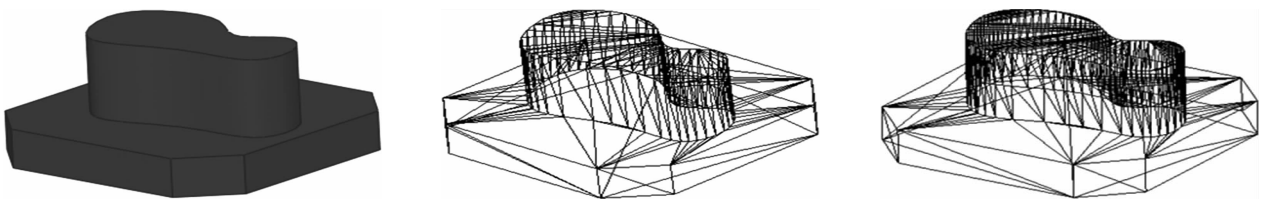


图 4 模型原图

图 5 STL 模型

图 6 局部细化 STL 模型

Fig. 4 Original image of model

Fig. 5 STL model

Fig. 6 Local refinement STL model

模型总高为 15 mm,设置层厚为 0.175 mm,对模型进行切片,处理完成后共生成 92 个切片轮廓. 依次对所有截面轮廓进行有无自由曲线的判定,并对含有自由曲线的截面轮廓提取轮廓点进行 NURBS 曲线的拟合. 判定后显示模型切片的前 33 层均为直线段不包含自由曲线,直接保存原始的截面轮廓作为产生成型代码的信息模型,而后 65 层的切片中均包含自由曲线. 以第 56 层切片轮廓的处理为例,获得其原始轮廓如下图 7 所示,截面与 STL 文件相交获得 50 个截面轮廓点,如图 8 所示,经过 NURBS 曲线拟合后的效果如图 9 所示. 对比可看出拟合后的曲线相比较直接用微小直线段连接数据点构成轮廓的图 7,明显减少了失真度,尤其是在曲率较大的部分,从图上看出了提高了轮廓的几何精度以及平滑度.



图 7 原始截面轮廓

图 8 截面轮廓点

图 9 NURBS 拟合后的轮廓截面

Fig. 7 The original section profile

Fig. 8 Sectional contour points

Fig. 9 The section profile after NURBS curve fitting

3 FDM 工艺验证

经过上述处理,在课题组开发的基于 FDM 工艺的三维打印机 DOGO480 上进行实例验证,将完成 NURBS 曲线拟合的切片文件导入系统,调整参数进行打印,并与未经拟合处理的初始切片打印效果进行比较. 成型结果如图 10、图 11 所示.

对比两图曲面放大部分可以明显看出,图 10 中曲线有微小的直线段,导致曲面部分有明显的棱边,而图 11 中构成曲面的曲线则明显不存在图 10 中的微小直线段,从而具有较高的平滑度以及成型精度,验证了 NURBS 曲线拟合对提高局部精度的效果.

4 结论

本文提出基于 NURBS 曲线拟合的提高 STL 零件局部精度的方法,在对 STL 模型局部细化的基础上

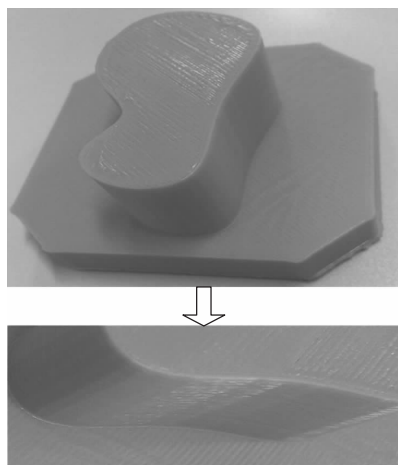


图 10 未拟合样品及局部放大图

Fig. 10 Sample unfitted and partial enlarged view

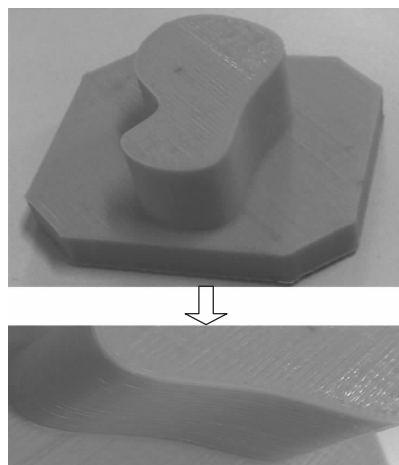


图 11 拟合后打印样品及局部放大图

Fig. 11 Sample after fitting and partial enlarged view

进行切片轮廓的曲线拟合. 保证各部分几何精度,为快速成型加工提供较好的原始数据基础,有效保证了自由曲面的加工质量. 目前随着计算机几何中 NURBS 曲线的运用越来越多,对于 STL 文件的层面轮廓重构技术仍然有待研究.

[参考文献] (References)

- [1] 杨继全,徐国财. 快速成形技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006:3-5.
Yang Jiquan, Xu Guocai. Rapid Prototyping Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006:3-5. (in Chinese)
- [2] 施建平,杨继全,李静波,等. 异质材料的建模与数字化微滴喷射技术研究[J]. 南京师范大学学报:工程技术版,2012, 12(1):10-15.
Shi Jianping, Yang Jiquan, Li Jingbo, et al. Study on the modeling and digital micro-droplet injection technology of heterogeneous material part[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2012, 12(1):10-15. (in Chinese)
- [3] Zhao Jibin, Xia Renbo, Liu Wenjun. Application of genetic algorithm in rapid prototyping[J]. Intelligent System and Knowledge Engineering, 2008, 1(3):481-485.
- [4] Koc Bahattin, MA Yawei, Lee Yuan shin. Smoothing STL files by biarc curves for rapid prototyping[J]. Rapid Prototyping Journal, 2000, 3(6):186-196.
- [5] 平雪良,高同军,于岩. RP 系统中 CAD 模型三角网格化的精度控制研究[J]. 现代制造工程,2008,7(11):37-40.
Ping Xueliang, Gao Tongjun, Yu Yan. Research on precision control of surface meshing on CAD model in rapid prototype system[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2008, 7(11):37-40. (in Chinese)
- [6] 杨光,刘炜军,王维,等. STL 格式文件拓扑重建及快速切片算法研究[J]. 现代制造工程,2009,8(10):32-37.
Yang Guang, Liu Weijun, Wang Wei, et al. Research on the rapid slicing algorithm based on STL topology construction[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2009, 8(10):32-37. (in Chinese)
- [7] 董涛,朱丽,侯丽雅,等. 叠层制造领域中 STL 模型平滑处理技术[J]. 机械工程学报,2003,39(1):117-123.
Dong Tao, Zhu Li, Hou Liya, et al. Smoothing technique for STL models in layered manufacturing field[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(1):117-123. (in Chinese)
- [8] 李震,江本赤,王建彬. STL 模型局部精度补偿方法研究[J]. 现代制造工程,2007,6(6):54-56.
Li Zheng, Jiang Benchu, Wang Jianbin. Research on the method used in partial precision compensation of STL model[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2007, 6(6):54-56. (in Chinese)
- [9] 莫容,常智勇. 计算机辅助几何造型技术[M]. 5 版. 北京:科学出版社,2009:114-116.
Mo Rong, Chang Zhiyong. Computer-Aided Geometric Design[M]. 5th ed. Beijing: Science Press, 2009:114-116. (in Chinese)
- [10] 赵吉宾,刘伟军,王越超. 基于 NURBS 曲线的 STL 模型截面轮廓平滑处理技术研究[J]. 小型微型计算机系统,2005, 25(3):497-502.
Zhao Jibing, Liu Weijun, Wang Yuechao. Smooth technique of STL model intersection contours based on NURBS curves[J]. MINI-MICRO Systems, 2005, 25(3):497-502. (in Chinese)

[责任编辑:刘 健]