

特征敏感的 3D 打印自适应切片算法

徐嘉辉 杨勤民 费知行 郭洋宏 吴婉婷

(华东理工大学 理学院数学系, 上海 中国 200237)

摘 要 3D 打印是一种快速成型技术, 它采用分层制造的思想, 将 STL 三维网格模型沿分层方向切片, 逐层加工形成模型实体。在切片过程中, 选择合适的切片厚度是一个关键问题。如果切片厚度很小, 会浪费大量的切片时间, 从而降低制造效率; 如果切片厚度很大, 会带来阶梯效应误差, 导致表面精度很低。我们改进常规的切片算法, 提出了一种基于特征敏感的度量(FS 度量)的自适应切片算法, 该算法能在相同切片数量的前提下更好地体现模型的局部几何特征, 提升 3D 打印的表面精度。

关键词 3D 打印; 切片厚度; 阶梯效应; 特征敏感的度量; 特征敏感的尖点高度

中图法分类号 TP391 DOI 号:

Feature sensitive 3D print adaptive slicing algorithm

Xu Jia-Hui, Yang Qin-Min, Fei Zhi-Xing, Guo Yang-Hong, Wu Wan-Ting

(School of Mathematical Sciences, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract 3D printing is a kind of rapid prototyping technology, which uses the idea of layered manufacturing. The STL mesh model is sliced along the slice direction, and formed layer by layer. Choosing appropriate slice thickness is a key topic in the slicing process. If the slice thickness is very small, it will waste a lot of time, so as to reduce the production efficiency. If the thickness of the slice is very large, it will bring the staircase effect error, resulting in a very low surface accuracy. By analyzing and comparing various kinds of mainstream slicing algorithm, we provide a slicing algorithm based on feature sensitive metric (FS Metric), which can better reflect the local geometric features of the model on the premise of the same number of layers, and improve the surface accuracy of 3D printing.

Key words 3D printing; slice thickness; staircase effect; feature sensitive metric; feature sensitive cusp height

1 引言

3D 打印是一种以数字模型文件为基础, 运用粉末状金属或塑料的可粘合材料, 通过逐层打印的方式来构造物体的快速成型技术(Rapid Prototyping, RP)。文献[1]指出, 3D 打印主要步骤是将原实体模型转换成由很多小三角形面片组成的 STL 格式文件, 在计算机中利用几何计算, 对 STL 网格模型切片处理后, 输出一系列相互平行的表面轮廓线, 为 3D 打印机提供打印路径, 最后层层叠加制造得到打印出来的成品。其中切片计算的过程往往是最重要的, 因为切片计算得到的切片轮廓线直接决定 3D 打印机的

打印路径, 也就直接影响最后成品的形状。

因此问题的关键在于确定一系列切片截面高度 $h_1, h_2, h_3, \dots, h_k$, 其中 k 为切片截面的个数, l 为切片之间的厚度:

$$\begin{cases} H = (h_1, h_2, h_3, \dots, h_k) \\ l = \Delta h = h_{s+1} - h_s, s = 1, 2, \dots, k-1 \end{cases} \quad (1)$$

如果对 STL 模型的切片厚度 l 很小, 会浪费大量的切片时间, 从而降低制造效率; 如果切片厚度 l 很大, 会带来阶梯效应误差, 导致表面精度很低。国内外目前有很多关于切片厚度的研究。最初, 人们常常采用等层厚切片, 但是这种方法往往带来较大的打印

收稿日期: 2016 年 5 月 21 日; 本课题得到华东理工大学市级大学生创新实验计划项目(No. s14083)的资助。徐嘉辉, 男, 1994 年生, 本科生, 主要研究领域为应用统计学、计算机图形学, E-mail: 373323107@qq.com。杨勤民(通讯作者), 男, 1977 年生, 博士, 讲师, 主要研究领域为计算机图形学与几何处理, E-mail: qmyang@ecust.edu.cn。费知行, 女, 1993 年生, 本科生, 主要研究领域为数字几何处理, E-mail: fzx1125@126.com。

第 1 作者手机号码: 18055958555, E-mail: 373323107@qq.com。

误差[2]。文献[3]提到,随后自适应切片算法替代了等层厚切片算法,它能根据模型形状的变化规律自动调整合适的切片厚度,以解决效率和精度之间的矛盾。本文在此基础上,提出了一种特征敏感的自适应切片算法,该算法相对于常规切片算法,能够较好地识别模型的局部几何特征。

2 常规的切片算法

切片算法实质是用一系列切片面(通常为平行于 XOY 平面的 Z 平面)去和用 STL 模型表达的三维实体表面进行求交点运算,截面轮廓就是这些所得交点的集合。而这些轮廓线之间的切片厚度由预先给定的精度要求所决定。

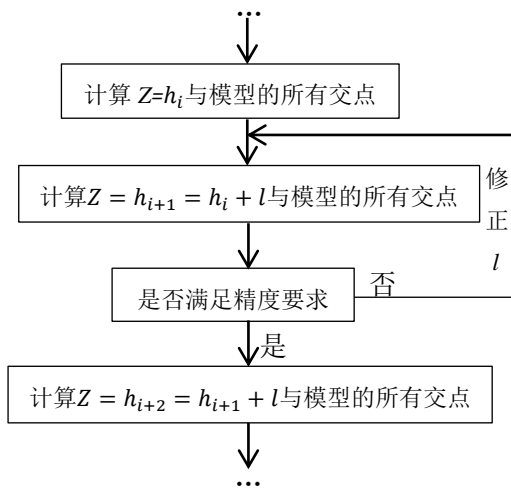


图1 切片算法流程图

如图1所示,每一次切片处理都必须满足给定的精度要求。如果不满足给定的精度要求,则需要及时修正切片厚度 l ,重新计算该层的所有交点。

2.1 交点计算

每个被切割的三角形面片与切片截面有两个交点,这两个交点相连接就是一条切片截面上的轮廓线的边,相邻的轮廓边由两个相邻的被切割三角形面片的交点形成。这样从初始三角形面片开始,通过追踪查找被切割的邻接三角形面片的交点,直到回到初始的三角形面片,就得到了一条封闭有序的轮廓线。文献[4]给出了交点计算的一般公式,设截面 $Z=h$ 与三角形面片的顶点 V_1, V_2 组成的边相交于 P_1 点,其中 V_1, V_2 点的坐标分别为

$(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$, 则交点 P_1 的坐标为:

$$\begin{cases} x_p = \frac{z_p - z_1}{z_2 - z_1}(x_2 - x_1) + x_1 \\ y_p = \frac{z_p - z_1}{z_2 - z_1}(y_2 - y_1) + y_1 \\ z_p = h \end{cases} \quad (2)$$

如此一来,通过计算切片截面和三角形网格的所有交点,迅速得到一系列相互平行的封闭轮廓线。为了判断切片结果是否满足精度要求,在实际中需要用一个参数来刻画用这些轮廓线表示原模型的误差。

2.2 阶梯效应和尖点高度

文献[5]提到,阶梯效应是指对 STL 网格模型进行切片处理后,层层叠加产生的锯齿状边界。阶梯效应是影响 3D 打印精度的主要因素之一,它使层与层之间的结合强度和表面顺滑度下降,影响成型精度。如图2所示, A 处的尖角特征消失, B 处平坦的斜面变成了形如 D 处的阶梯,导致特征丢失以及平坦区域的特征改变。

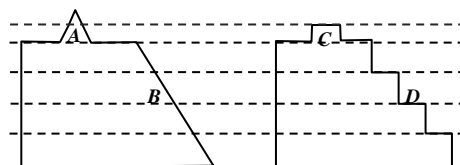


图2 阶梯效应

为了有效地消除阶梯效应,减少由于表面误差影响的成型精度, Dolenc 和 Makela 在文献[6]中首次提出了尖点高度 (cusp height) 的概念,并很快地在 3D 打印切片算法中得到举足轻重的认可,成为刻画切片误差的一个重要参数。

如图3所示,对 STL 网格模型进行切片处理后,会与原 CAD 模型产生一定的误差。将这部分误差用尖点高度 c 来刻画,尖点高度 c 越小,则误差越小;尖点高度 c 越大,则误差越大。

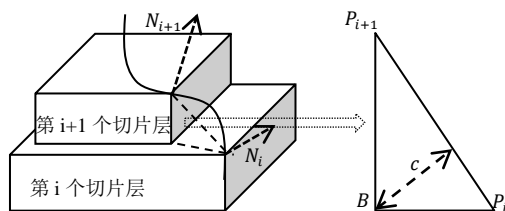


图3 尖点高度

假设在第 i 个切片层任意一个交点 P_i 处对应的切片厚度为 l , 第 $i+1$ 个切片层与 P_i 相对应的交点 P_{i+1} 与 P_i 的水平距离记为 δ 。则尖点高度 c 可用以下式子计算:

$$c = \frac{l\delta}{\sqrt{l^2 + \delta^2}} \quad (3)$$

2.3 基于尖点高度的切片算法

从式 (3) 易看出, 当 δ 固定时, 尖点高度 c 的大小随着切片厚度 l 的增加而增加。Dolenc 和 Makela 在文献[6]中给出了利用尖点高度确定切片厚度的方法。在切片处理之前, 预先给定可允许的切片厚度最大值 l_{max} 和最小值 l_{min} , 以及尖点高度 c 的阈值 C_{max} , 在尖点高度不超过阈值的前提下, 当前切片层的厚度由上一层的尖点高度确定。交点 P_i 处的单位外法向量记为 $N = (N_x, N_y, N_z)$, 对应的尖点向量为 $C = cN$, 且满足 $\|C\|_2 \leq C_{max}$ 。于是当前的切片厚度可以由式 (4) 计算:

$$l = \frac{C_{max}}{N_z}, N_z \neq 0 \quad (4)$$

如果 $N_z = 0$ 或者 $l \geq l_{max}$, 则 $l = l_{max}$; 如果 $l \leq l_{min}$, 则 $l = l_{min}$ 。

3 特征敏感的自适应切片算法

在数字几何处理领域, 特别是离散的网格编辑和处理方法中, 我们越来越重视模型整体处理的高度精确, 因此不能忽视特征敏感的区域含有的信息量。Lai, Hu 等人在文献[7]中指出, 特征通常指曲面上具有至少一个较大的主曲率的区域, 显而易见, 这些特征敏感的区域会是 3D 打印切片分层需要考虑的关键部位。常规自适应切片算法虽然能够在一定程度上有效地消除阶梯效应, 减少由于表面误差影响的成型精度, 但是对于特征敏感的区域仍然没有较好的处理效果。在图 3 中, 交点 P_i 和 P_{i+1} 的单位外法向量如果发生了突变, 也即该区域的曲率较大, 点 B 的“单位外法向量”是不可以用交点 P_i 的单位外法向量近似代替的。因此这种切片算法对于特征敏感的区域处理效果仍然有所欠缺。

3.1 特征敏感的度量

给定任意一个 R^3 空间里的 C_2 连续二维

流形 ϕ , 对于该二维流形 ϕ 上的任意一点 $V(V \in \phi)$, Pottmann 将其唯一映射到 R^6 空间中的点 V_f [8], V_f 记为:

$$V_f = (v, \omega n(v)) \quad (5)$$

其中 $v = (v_x, v_y, v_z)$, 表示点 V 在 R^3 空间里三个坐标分量, $n(v) = (n_x(v), n_y(v), n_z(v))$, 表示点 V 在 R^3 空间里的单位外法向量。一般地, 把这个二维流形 ϕ 上的每一点全都一一映射到 R^6 空间里, 可以得到唯一的 ϕ_f 。通过直接测量 ϕ_f 在 R^6 空间里的欧氏距离, 能够得到一种度量, Lai, Hu 等人在文献[7]中称之为特征敏感的度量 (FS 度量, feature sensitive metric), 其对应的 R^6 空间为一个 FS 空间。

这里 ω 称为敏感因子, 它是一个常数。 ω 的取值越大, 则特征敏感程度越大; 相反 ω 越小, 特征敏感程度越小, 当 $\omega = 0$ 时, 就完全忽略了法向量的作用, 此时 FS 空间退化为 R^3 的欧氏空间。

3.2 特征敏感的尖点高度

任意给定两点 v' 和 v'' 的坐标及其单位外法向量 n' 和 n'' , 式 (6) 是计算这两点在 FS 度量下的距离的一般公式:

$$d_f = \left[\sum_{x,y,z} (v_i'' - v_i')^T (v_i'' - v_i') + \sum_{x,y,z} \omega^2 (n_j'' - n_j')^T (n_j'' - n_j') \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

为了弥补现有切片算法在处理特征敏感区域的局限性, 我们提出了特征敏感的尖点高度, 使得特征敏感的尖点高度能够在 3D 打印切片算法中对特征敏感区域的识别和提取有较好的效果。

我们定义特征敏感的尖点高度 c_f 为:

$$c_f = \frac{l \cdot \delta}{\left[\sum_{x,y,z} (v_i'' - v_i')^T (v_i'' - v_i') + \sum_{x,y,z} \omega^2 (n_j'' - n_j')^T (n_j'' - n_j') \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

这里 l 表示在任意一个交点 P_i 处该层的切片厚度, 第 $i+1$ 个切片层与 P_i 相对应的交点 P_{i+1} 与 P_i 点的水平距离记为 δ , v_i' 和 v_i'' 分别表示交点 P 与 P_{i+1} 的坐标, n_j' 和 n_j'' 分别表示 P 与 P_{i+1} 的单位外法向量, ω 是敏感因子。

很显然, 由式 (6) 可知, 在单位外法向量发生突变的情形下, FS 度量意义下的

距离计算较大, 因此由式 (7) 所决定的特征敏感的尖点高度 c_f 相对较小, 再由式 (4) 所决定的切片厚度 l 也随之相对较小。这正符合了特征敏感的区域切片厚度较小的理论要求, 能够在 3D 打印切片分层时更好地处理特征敏感的区域, 尽可能地不遗漏这些区域的信息量。

3.3 算法流程

引入特征敏感的尖点高度之后, 我们设计了一种特征敏感的 3D 打印自适应切片算法。本算法的核心思想是通过即时计算特征敏感的尖点高度, 不断调整切片的厚度。具体的做法是:

计算第 i 个切片截面 $Z = h_i$ 与 STL 网格模型的所有交点, 然后取给定的最大可允许层厚 L_{max} 计算第 $i+1$ 个切片截面 $Z = h_i + L_{max}$ 与 STL 网格模型的所有交点, 由此计算第 i 个切片截面上所有交点特征敏感的尖点高度, 如果全都满足 $\|C\|_2 \leq C_{max}$, 则该层的切片厚度 $l = L_{max}$; 如果不全满足 $\|C\|_2 \leq C_{max}$, 则将切片厚度修正为

$$l = \min \left\{ L_{max} - \tau, \left\{ \frac{C_{ij}}{N_{(z)ij}} \right\} \right\} \quad (8)$$

若 $l < L_{min}$ 则 $l = L_{min}$, 这里 τ 是预先给定的厚度调整量。重新计算第 $i+1$ 个截面的交点后, 再次计算第 i 个切片截面上所有交点特征敏感的尖点高度, 直到该层所有的交点都满足 $\|C\|_2 \leq C_{max}$ 为止。算法的步骤如下:

- 1) 读取 STL 文件的数据;
- 2) 将所有顶点坐标进行预处理, 记录网格模型三角形边数 $num(e)$, 所有顶点 Z 轴坐标的最大值 Z_{max} 和最小值 Z_{min} ;
- 3) 设定切片参数: 切片最大厚度 L_{max} 、切片最小厚度 L_{min} 、厚度调整量 τ 、最大可允许尖点高度 C_{max} 、敏感因子 ω ;
- 4) 依据 Z_{min} 设定 h_0 , 初始化 $h = h_0 + L_{max}$;
- 5) $i = 1, j = 1$;
- 6) 判断 $Z=h$ 是否与第 j 条边相交。若相交, 则依据式 (2) 计算交点, 并且计算该边所在三角形面片的另一个交点, 将两交点相连得到一条轮廓线的边; 若不相交, 则 $j = j + 1$, 并重复该步骤;
- 7) 判断 STL 三角形网格模型的所有边是

否已经完全遍历。若是, 则转下一步骤; 若否, 则 $j = j + 1$, 并重复步骤 6);

8) 判断层高 h 是否超出网格模型所有顶点 Z 轴坐标的最大值 Z_{max} 。若否, 则转下一个步骤; 若是, 则结束切片算法;

9) 计算第 i 个切片层所有交点特征敏感的尖点高度 $C_{ik}(k = 1, 2, \dots)$;

10) 判断该层所有交点特征敏感的尖点高度 $C_{ik}(k = 1, 2, \dots)$ 是否满足 $\|C\|_2 \leq C_{max}$ 。若是, 则 $h = h + L_{max}$, $i = i + 1$, 并重复步骤 6); 若否, 则转下一个步骤;

11) 将层厚修正为 $l = \min\{L_{max} - \tau, \{\frac{C_{ik}}{N_{(z)ik}}\}\}$, 切片截面的高度经过修正为 $h = h - L_{max} + l$, 并重复步骤 6)。

该算法的优点在于特征敏感的尖点高度能体现几何模型特征敏感的区域; 并且其占用的内存不大, 需要利用到的交点的单位外法向量都利用已知数据即时计算出来。

4 实验结果

我们在 Matlab R2012b 中编写程序实现 3D 打印各种切片算法的实验结果并做了具体的展示。我们针对“龙”的几何模型和“马”的几何模型分别编写了等层厚切片算法、常规自适应切片算法以及特征敏感的自适应切片算法, 并在相等切片数量的情况下, 将结果一一作出比较和分析。为便于比较实验结果, 更好地得出结论, 实验过程统一采取切片数量为 30 层, 敏感因子 ω 依据经验统一设定为 0.07。

图 4 和图 5 分别是 Dragon (龙) 模型和 Horse (马) 模型的切片结果。其中左边为等层厚切片结果, 中间为常规自适应切片结果, 右边为特征敏感的自适应切片结果。

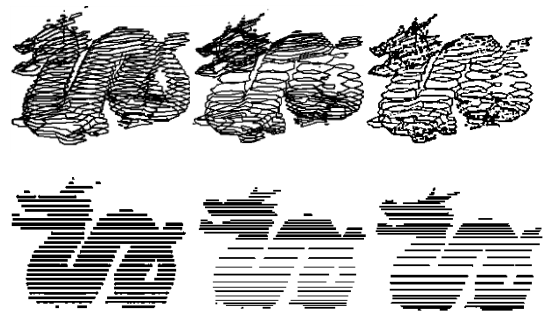


图 4 Dragon 模型的切片结果(上为三维, 下为二维)

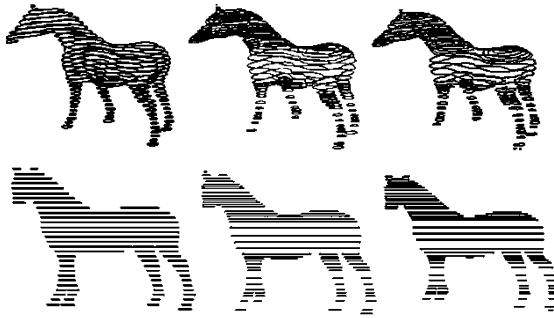


图5 Horse模型的切片结果(上为三维,下为二维)

显然改进的算法相比于常规切片算法,在相等切片数目的情况下,特征敏感的区域切片厚度更薄。例如,图4中“龙角”和“龙爪”包括“龙身”的弯曲部分信息都更加完整;图5中马的“腿部”以及“耳部”这些局部几何特征的处理效果也更细致。

5 总结与展望

本文的主要贡献是设计了一种全新的3D打印切片算法,即特征敏感的自适应切片算法。该算法能够在常规切片算法消除阶梯效应,减少切片误差的基础上,识别模型的局部几何特征,对曲率较大的特征敏感区域做更好的切片处理,达到模型整体处理的更高精确度。

对于本文的理论框架,仍然有一些不可忽视的因素需要研究和讨论。特别地,本文没有给出一个确定敏感因子 ω 的完善的理论体系。目前我们所知道这是一个尺度的相关概念,它的取值是一个经验值,在很大程度上依赖于特定的模型和实验的结果。因此我们希望能够未来通过统计等方法研究 ω 参数的合理取值。

参考文献

- [1]Liu Ligang, Xu Wenpeng, Wang Weiming, Yang Zhouwang, Liu Xiuping. Survey on Geometric Computing in 3D Printing. Chinese journal of computers, 2014, 32(4): 91-102(in Chinese)
刘利刚,徐文鹏,王伟明,杨周旺,刘秀平. 3D 打印中的几何计算研究进展. 计算机学报,2014, 32(4): 91-102
- [2]Wang Chunxiang, Hao Zhibo. The Uniform Thickness Hierarchical Algorithm of Rapid Prototyping Technology STL Model. Machinery Design & Manufacture,2014(4):133-136(in Chinese)
王春香,郝志博. 快速成型技术 STL 模型等厚分层算法研究. 机械设计与制造,2014(4):133-136
- [3]Wang Jingya, Fang Liang, Hao Jingbin. Adaptive slicing algorithm of STL model based on feature facets. Application Research of Computers,2011,28(6):2361-2368(in Chinese)
王静亚,方亮,郝敬宾. STL 模型特征面片自适应分层算法. 计算机应用研究,2011,28(6):2361-2368
- [4]Wang Zhengyou, Huang Linlin, Zhang Guoxian. 3D sculpture algorithm based on hierarchical slicing theory. Journal of Computer Applications. 2011,31(2):379-382(in Chinese)
王正友,黄林林,张国贤. 基于分层切片原理的三维雕刻算法. 计算机应用, 2011,31(2):379-382
- [5]Zhao Jibin, Liu Weijun. Recent progress in slicing algorithm of rapid prototyping technology. Computer Integrated Manufacturing Systems. 2009,15(2):209-221(in Chinese)
赵吉宾,刘伟军. 快速成型技术中分层算法的研究与进展. 计算机集成制造系统,2009,15(2):209-221
- [6]Dolenc A and Makela I. Slicing procedures for layered manufacturing techniques.Computer aided design.1994, 26(2).
- [7]Lai Yukun, Zhou Qianyi, Hu Shimin, Johannes Wallner, Helmut Pottmann. Robust Feature Classification and Editing. Proceedings of TVCG 2007.
- [8]Pottmann,H.,Steiner,T.,Hofer,M.,Haider,Hanbury. The isophotic metric and its application to feature sensitive morphology on surfaces. Proceedings of ECCV 2004.

Background

3D printing has been one of the hottest topics in the field of science and technology, which finds many applications in every aspects of our life. The entire production process of prototyping, by Rapid prototyping (RP), is based on creation of geometric model in a solid modeler, slicing, generation of laser scanning paths or material deposition paths, layer-by-layer deposition and then post processing operations. Time consumption is less to create a solid model or to carry out engineering changes in an existing solid model.

In all processes, the solid model of a component to be produced is created in CAD environment and is sliced before transferring the data to the RP machine. The procedure followed for transferring the data from the CAD model to RP system. CAD model can be created as a solid model (by using primitive instancing or constructive solid geometry) or a surface model (by using B-rep). A tessellated (.STL) version of the model can then be exported. It is clear that the slicing of the model can be carried out either directly on a solid or a surface model of the product or on a tessellated model. In slicing, sets of horizontal planes are intersected with model. This results in closed curves or polygons. The space between any two consecutive horizontal planes is referred to as a slice.

Different published slicing algorithms are presented and classified into two major categories. Many researchers implemented adaptive slicing and used cusp height as limiting parameter assuming build edge profiles as rectangular. Very few adaptive slicing algorithms are implemented considering build edges as sloping. Limited area deviation between any two consecutive slices is also attempted without considering the surface geometry of the part.

This project is supported by the innovation experiment project of East China University of Science and Technology. The main contribution of this paper is to design a new 3D printing slice algorithm, which is an adaptive slicing algorithm based on FS metric. The algorithm can eliminate staircase effect, slicing error based on identifying the geometric model of small features. For large curvature feature sensitive

areas do better slice processing, to model the overall treatment more high accuracy.