

保留 STL 模型特征细节的 3D 打印自适应分层算法

弋英民¹, 李迎国¹, 刘柏均¹, 苑易伟¹, 李艳恺¹, 张新雨¹, 解瑞东², 李哲行¹

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 710048, 西安;

2. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 710048, 西安)

摘要: 针对传统的 3D 打印自适应分层算法存在计算过程复杂、无法消除阶梯效应影响、不能保留模型特征以及特征容易丢失等问题, 提出了一种改进的保留 STL 模型特征细节的自适应分层算法。该算法首先判断模型当前层是否含有显著特征边; 然后针对当前层含有显著特征边的情况, 通过相邻 2 个三角网格法矢量的夹角来适应性确定层厚, 对不含显著特征边的情况, 利用三角网格法矢量与成型方向的夹角来自适应确定层厚, 对于模型存在特征偏移的情况, 则通过相邻切平面封闭曲线个数变化来适应性地确定层厚; 最后将上述 3 种情况下自适应层厚的最小值作为当前分层的依据。研究结果表明: 对于所采用的恐龙模型, 所提算法不仅很好地保留了模型的细节特征, 而且显著提升了模型成型质量; 与基于三角面片法的矢量自适应分层算法和仅保留模型特征的自适应分层算法相比, 所提算法的模型精度分别提升了 28.6% 和 31.7%。该算法减小了阶梯效应以及模型特征丢失和偏移对打印质量的影响, 提高了模型的打印精度。

关键词: 3D 打印; STL 模型; 自适应分层; 模型特征细节; 三角网格

中图分类号: TM715 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202308011 **文章编号:** 0253-987X(2023)08-0105-10

Adaptive Layering Algorithm for 3D Printing with Stereolithography Model Feature Details Retained

YI Yingmin¹, LI Yingguo¹, LIU Bojun¹, YUAN Yiwei¹, LI Yankai¹,

ZHANG Xinyu¹, XIE Ruidong², LI Zhexing¹

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: An improved adaptive layering algorithm with STL model feature details retained is proposed for problems of the traditional adaptive layering algorithm for 3D printing, such as complicated calculation, inability to eliminate the influence of the step effect on the model, failure to retain model features, and easy loss of model features. The improved algorithm first determines whether the current layer contains significant feature edges. It then adaptively determines the layer thickness by the angle between the two adjacent triangular mesh vectors for the case with such edges, by the angle between the triangular mesh vector and the forming direction for the case without such edges, and by the change in the number of closed curves in the adjacent tangent planes for the case where the model has feature offsets. Finally, the minimum value of the adap-

tive layer thickness in the above three cases is used as the basis for the current layering. The results show that, for the adopted dinosaur model, the proposed algorithm not only retains the detailed features of the model, but also significantly improves the modeling quality; the proposed algorithm has an accuracy 28.6% and 31.7%, respectively, higher than that of the vector adaptive layering algorithm based on the triangular slice method and the adaptive layering algorithm that only retains the model features. The algorithm reduces the influence of step effect and model feature loss and offset on the printing quality, improving the model printing accuracy to a certain extent.

Keywords: 3D printing; STL model; adaptive layering; model feature; triangular mesh

近年来,3D打印技术已成为智能制造业研究领域的热点。3D打印技术实质上采用的是一种微积分思想^[1],其中微分过程是通过计算机将建模好的三维数字模型进行分层,将得到的一系列二维分层轮廓再进行相应的填充路径规划,继而将得到的数据转换为3D打印机能够识别的Gcode指令文件;而积分过程是将分层得到的Gcode指令文件传送给3D打印机,打印机按照分层指令,自上而下逐层累积叠加打印,进而得到实体模型^[2-3]。由于3D打印这种逐层累积叠加的工艺原理,若分层厚度设置较大,在沿着Z轴层层累积叠加过程中会产生明显的阶梯效应,直接影响模型精度。为了提升STL模型成型质量,减小阶梯效应对模型成型质量的影响,理应适当减小分层厚度,但同时也会导致打印效率的降低和制造成本的提高^[4-5]。由此可见,传统的等层厚分层不能很好地解决因3D打印工艺原理带来的模型成型质量与打印效率之间的矛盾。

自适应分层能够根据模型自身特点适应性地改变层厚,不仅能减小阶梯效应对模型的影响从而提升模型打印精度,也能使打印效率有所提升。国内外学者对自适应分层进行了相关研究,旨在使模型成型质量与打印效率之间达到一定平衡^[6]。文献[7-8]首先根据STL模型三角面片点表和面表之间的关系重建其拓扑信息,通过相邻切平面的面积变化率适应性地改变分层层厚,但如果相邻切平面面积没有发生变化,此方法就不再适用。文献[9-10]根据模型表面轮廓曲率进行自适应分层,在曲率较大处采用较小层厚,在曲率较小处增加分层厚度,但存在曲率求解复杂、算法时间复杂度高等问题。文献[11-13]利用STL模型三角面片法向量与成型方向的夹角来自适应调节分层厚度,可以有效地减小阶梯效应对模型的影响,但对模型特征细节不能很好识别。文献[14]提出基于体积误差最小,寻找最优的三角面片法向量与成型方向的夹角来实现自适应分层,但由于每次分层过程都要寻找最小体积误

差所对应的三角面片与成型方向的夹角,增加了算法的时间复杂度,同时也由于可能存在未被截交的三角面片,难以得到确切的分层厚度而导致模型特征丢失。文献[15-17]通过提取模型显著特征,根据模型几何特征来改变层厚,虽然能够有效识别模型的微小细节特征,但没有考虑阶梯效应对模型的影响。文献[18]通过构建模型多阶环形邻域,采用变尺度的平均曲率高斯加权平均值法计算模型显著度,运用动态聚类确定模型显著特征,从而建立自治的分层规划正向设计数学模型,但算法过程复杂且实际工程并不实用。文献[19]以STL模型三角面片法向量与成型方向夹角为基础,给出了一种识别模型特征的方法,不仅能减小阶梯效应也能很好地识别模型细节特征,该算法将模型锐边和复杂点作为模型特征,但并未给出模型锐边与复杂点的具体识别方法。

针对目前存在的自适应分层算法既不能有效地减弱阶梯效应对模型表面光洁度的影响也不能很好地识别模型细节特征,以及算法复杂度高等问题,本文提出了一种改进的保留STL模型特征细节的自适应分层算法,采用2种简单易行的模型细节特征识别方法,在模型特征处适应性地选取最小分层厚度作为分层依据,能够减小阶梯效应对模型表面精度影响。该算法充分考虑到模型表面精度的影响因素,进一步提高了模型的成型质量。

1 STL模型数据格式与阶梯效应

1.1 STL模型数据读取

STL模型的数据格式由大量无序的空间三角面片网格构成,每个网格均包含3个顶点和法向量,用来近似描述三维数字模型。由于其文件格式具有简单直观且易读取的优点,故常用于3D打印。STL模型有2种标准数据格式:一种以文本(ASCII)形式保存坐标信息,另一种是以二进制(Binary)形式保存坐标信息^[20],如图1所示。

ASCII	Binary
solid filename	UINT8[80]-Header
facet normal nx ny nz	UINT32-Number of triangles
outer loop	foreach triangle
vertex v1x v1y v1z	REAL32[3]-Normal vector
vertex v2x v2y v2z	REAL32[3]-Vertex 1
vertex v3x v3y v3z	REAL32[3]-Vertex2
endloop	REAL32[3]-Vertex3
endfacet	UINT16-Attribute byte count(0)
:	:
endsolid filename	end

图 1 STL 文件的 2 种标准数据格式

Fig. 1 Two standard data format of STL file

进行分层数据处理之前,首先要对 STL 模型三角面片的顶点和法矢量信息进行读取,本文参考文献[21],对 STL 模型的顶点和三角面片之间进行了拓扑关系重建,并通过 MATLAB 软件读取 STL 模型的数据,生成的模型如图 2 所示。



(a)恐龙 (b)女孩雕像

图 2 2 种 STL 模型

Fig. 2 STL model of 2 statues

1.2 阶梯效应

对 STL 模型数据读取完成后,接着进行相应的分层处理。首先设置分层厚度,在一定厚度的约束下,沿着 Z 轴打印方向开始分层,求取该模型与垂直于 Z 轴的切平面截交的二维轮廓信息,即完成分层。然后再对分层后得到的一系列二维轮廓数据进行相应的填充路径规划处理,将数据转化为 Gcode 指令代码后发送给 3D 打印机,打印机按照 Gcode 指令逐步累积叠加打印,就可得到实体模型。

设 STL 模型在分层过程中第 i 个分层层片的体积为 V_i ,则实体模型的体积为

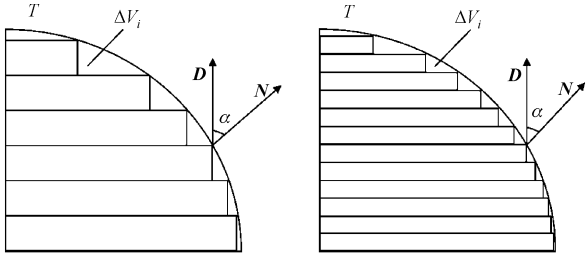
$$V = \lim_{d \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n V_i \tag{1}$$

式中: d 为各个层片的分层厚度; n 为分层层数,当

$n \rightarrow \infty$ 且 $d \rightarrow 0$ 时,打印的 STL 实体模型与三维数字模型趋于一致。但在实际打印过程中,由于制造工艺约束,打印机喷头直径不可能趋于无穷小(一般为 0.4 mm),即分层厚度不可能趋于无穷小,而是介于打印设备和成型工艺所要求的最大与最小值之间,则成型的实体模型只是无限趋于三维数字模型,此时式(1)变为

$$V \approx \sum_{i=1}^n V_i \tag{2}$$

正是因为 3D 打印的这种制造工艺,才导致模型出现阶梯效应。图 3 给出了不同分层厚度下阶梯效应对模型的影响,其中 T 为模型表面, D 为 STL 模型成型方向, N 为 STL 模型在该点处三角面片网格的法矢量, α 为 STL 模型在该点处三角面片网格法矢量与成型方向的夹角, ΔV_i 为第 i 层的打印几何误差。等层厚分层情况下,当分层厚度较大时,图 3(a)所示模型的阶梯效应非常显著,导致模型成型质量下降,但由于分层的层数较少则打印效率较高;当分层厚度较小时,图 3(b)所示模型的阶梯效应明显减弱,模型的成型质量较高,但由于分层层数较多导致打印效率下降。



(a)较厚分层 (b)较薄分层

图 3 不同分层厚度下 STL 模型的阶梯效应示意图

Fig. 3 Schematic diagram of different layered thickness step effects of STL model

2 自适应分层算法

2.1 三角面片法矢量的分层算法

在阶梯效应显著或模型细节特征较多的地方,自适应分层算法能够采用较小的分层厚度,保证模型的成型质量;在阶梯效应不显著或模型细节特征较少的地方、在满足成型质量的前提下,自适应分层算法会适当增大分层厚度以提升模型的打印效率,使模型成型质量和打印效率之间达到一定平衡^[22]。由图 3 可见,针对同一种分层厚度的 STL 模型,成型方向与该点处三角面片网格法矢量的夹角 α 和第 i 层的打印几何误差 ΔV_i 存在如下关系: α 越大, ΔV_i 越小, α 是由 STL 模型自身轮廓所决定的,不能针

对某个三角面片进行更改。因此,考虑建立 α 和层厚之间的几何关系,通过合理地改变层厚来降低几何误差 ΔV_i ,从而提高打印精度。

当打印层厚改变时,相应的几何误差 ΔV_i 也会发生变化, ΔV_i 反应了模型的表面粗糙度(即模型精度),采用文献[11]中的阶梯高度 δ 作为模型的几何误差评价指标。图 4 所示为相邻切平面 Z_i 和 Z_{i+1} 与 STL 模型表面 T 相交的示意图,其中 α_i 为第 i 层模型打印成型方向与 STL 模型在该点处三角面片的法矢量的夹角, δ_i 为模型第 i 层阶梯高度, d_i 为第 i 层分层厚度。

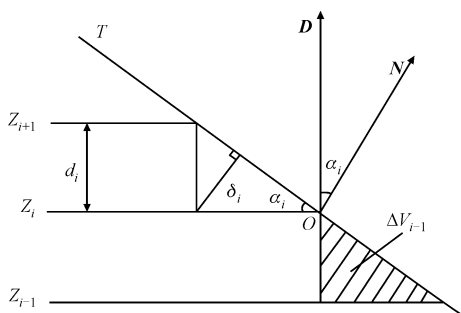


图 4 切片面与 STL 模型截交示意图

Fig. 4 Slice surface intercepts with STL model

由图 4 可得 α_i 为

$$\alpha_i = \arccos \frac{ND}{|N||D|} \quad (3)$$

若 $\alpha_i > 90^\circ$, 则式(3)中 α_i 取为 $180^\circ - \alpha_i$; 若 $\alpha_i = 0^\circ$, 表明该三角面片与切平面平行, 则删除该三角面片, 故 α_i 的取值范围为 $\alpha_i \in (0, \pi/2]$ 。当 α_i 减小时, 阶梯高度 δ_i 增大, 成型实体精度降低, 此时可以通过减小分层厚度来减小 δ_i , 即 α_i 减小对应分层厚度 d_i 也随之减小。当 α_i 增大时, 阶梯高度 δ_i 减小, 成型实体质量提高, 在满足加工精度的前提下, 可以适当增加分层厚度, 来提高打印效率, 即 α_i 增大对应分层厚度 d_i 增大。这种关系可以表述为

$$d_i = 1 - \cos \alpha_i \quad (4)$$

根据设备加工和工艺要求, 设定的层厚一般在一定范围内, 即 $d_i \in [d_{\min}, d_{\max}]$, 其中 $d_{\min}$ 和 $d_{\max}$ 分别为分层层厚的最小值和最大值。根据式(4)中 α_i 和 d_i 的关系, 可得如图 5 所示的第 i 层成型方向与该点处三角面片法矢量的夹角 α_i 和第 i 层分层厚度 d_i 之间的对应关系, 则基于三角面片法矢量的自适应层厚计算方式如下

$$d_i = d_{\min} + (d_{\max} - d_{\min})(1 - \cos \alpha_i) \quad (5)$$

由于阶梯高度可写为

$$\delta_i = d_i \cos \alpha_i \quad (6)$$

则 STL 模型的整体平均阶梯高度为

$$\delta_{av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (7)$$

因此, 可将 STL 模型的整体平均阶梯高度 δ_{av} 作为模型精度的评价指标。

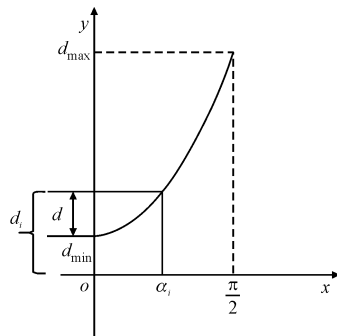


图 5 STL 模型分层厚度关系图

Fig. 5 Schematic diagram of layer thickness for STL model

2.2 保留模型细节特征的分层算法

基于三角面片法矢量的自适应分层算法虽然能够有效地减小 STL 模型的阶梯效应, 提升模型的成型质量, 但可能会引起模型特征细节的丢失和偏移。图 6 为等层厚分层恐龙模型的二维截面图, 可以看到模型表面存在许多特征细节, 若模型特征细节处或特征偏移处的三角面片法矢量与成型方向的夹角 α 接近于 90° , 其阶梯效应并不显著。因此, 基于三角面片法矢量的自适应分层算法, 并不能减小分层厚度, 反而会导致模型特征细节的丢失和偏移^[19]。

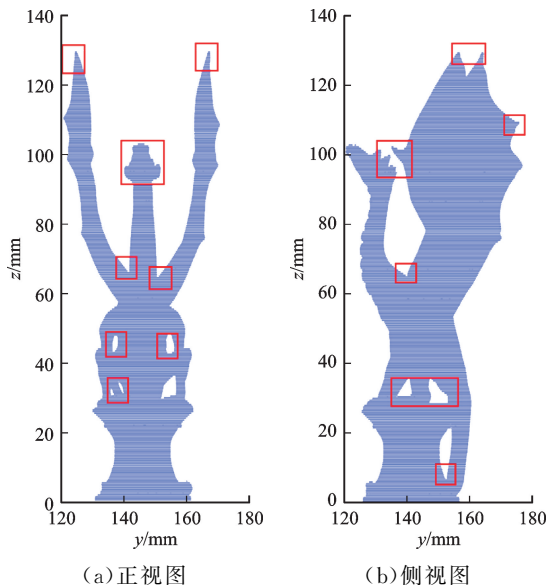


图 6 等层厚分层恐龙模型的二维截面图

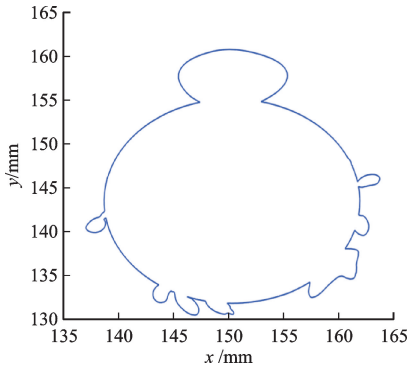
Fig. 6 2D section of equal thickness layering of dinosaur model

若模型表面复杂度或相邻切平面的封闭曲线个数发生变化,则模型必然存在特征细节和特征偏移。因此,本文将相邻切平面封闭曲线个数的变化作为模型特征偏移的判别依据,将相邻两个三角面片的二面片的法向量的夹角大于一定阈值作为模型特征细节的判别依据。

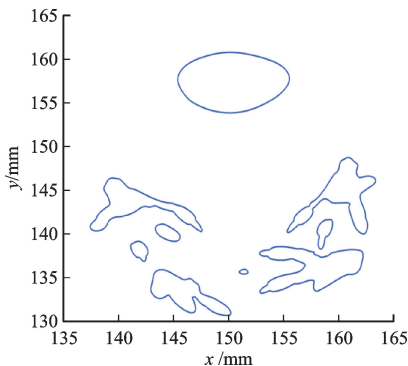
(1) 模型特征偏移的判别依据:如果 STL 模型相邻切平面的封闭曲线发生变化,那么这两个相邻分层平面必然存在模型特征的偏移。图 7 所示为等层厚分层恐龙模型的二维轮廓图,其中图 7(a)为恐龙模型在第 58 层的二维分层轮廓,此时封闭曲线个数为 1;图 7(b)为恐龙模型在第 59 层的二维分层轮廓,其封闭曲线个数为 9;图 7(c)为恐龙模型在 60 层的二维分层轮廓,此时封闭曲线个数为 7。恐龙模型相邻切片面封闭曲线个数的变化会伴随模型特征的出现,可以利用相邻切片面封闭曲线个数的变化表征模型特征的变化,即

$$|C_{i+1} - C_i| > 0 \quad (8)$$

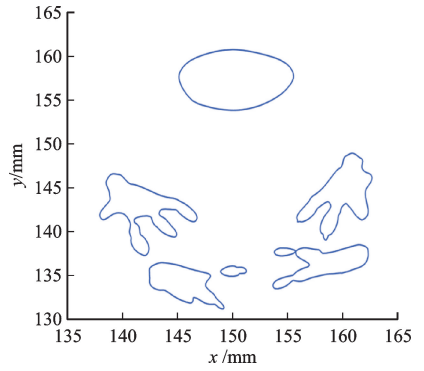
式中: C_i 表示第 i 层的分层轮廓数。本文将相邻轮廓数变化大于 0 作为模型特征偏移的判别条件,如果模型特征数目变化较大,则相邻封闭曲线的个数也会发生较大变化,为了尽可能保留这些特征,这时应相应地减小分层厚度;当相邻封闭曲线的个数变化较小或没有发生变化,则应适当增加分层厚度以提高打印效率。自适应分层厚度可表示如下



(a) 第 58 层



(b) 第 59 层



(c) 第 60 层

图 7 等层厚分层恐龙模型二维轮廓图

Fig. 7 2D outline drawing of equal thickness layering dinosaur model

$$d'_i = d_{\max} - (d_{\max} - d_{\min}) \frac{|C_{i+1} - C_i|}{C_{i+1} + C_i} \quad (9)$$

(2) 模型特征细节的判别依据:模型的显著特征边可以很好地表征模型表面复杂度的变化^[15],本文将模型显著特征边作为表征模型显著特征的另一依据。图 8 所示为含有公共边 L 的两个三角面片网格二面角示意图,其中两个三角面片网格的法矢量分别为 N_i 、 N_{i+1} ,法矢量 N_i 与 N_{i+1} 的夹角为 θ ,计算公式可写为

$$\theta = \arccos \frac{N_i \cdot N_{i+1}}{|N_i| |N_{i+1}|} \quad (10)$$

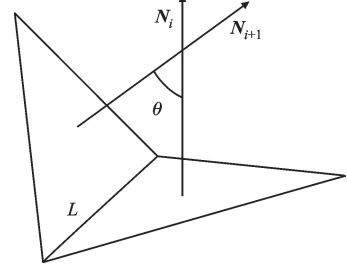


图 8 两个三角面片网格二面角示意图

Fig. 8 Schematic diagram of dihedral angle

两个三角面片网格法矢量的夹角 θ 能够反应出 STL 模型表面是否平滑, θ 越小表示相邻的三角面片越平滑,若 θ 为 0° 则表示两个三角面片共面。当 θ 大于某个阈值 φ 时,表明相邻三角面片包含的公共边 L 是模型的特征边。

θ 与分层层厚的关系为:当 θ 增大时,模型特征越显著,则期望分层厚度越小;当 θ 减小时,模型特征不太显著,则期望的分层厚度应适当增大,由此得到自适应分层厚度为

$$d''_i = d_{\max} - (d_{\max} - d_{\min}) \left(\frac{1 - \cos \theta}{2} \right) \quad (11)$$

设模型显著特征边的阈值为 φ , 两个三角面片网格法矢量的夹角 $\theta \in [\varphi, 180^\circ)$ 。阈值 φ 随着 STL 网格模型精度的变化而变化, 这里参考文献[15]来适应性地选取阈值 φ , 其表达式为

$$\varphi = \begin{cases} \beta + \beta(1 - \lambda)/4, & \beta \leq 20^\circ \\ 20^\circ + \beta(1 + \lambda)/4, & \beta > 20^\circ \end{cases} \quad (12)$$

式中: β 是模型中所有相邻三角面片网格法矢量夹角 θ 的平均值; $\lambda = \lg F$, F 为 STL 模型的网格精度。

2.3 算法流程

在 3D 打印成型过程中, 初始层通常具有边缘支撑结构, 以确保模型和打印平台之间可靠连接, 避免模型翘曲变形。初始层厚度一般是人为设定, 从模型的第 2 层才开始进行自适应分层, 本文的自适应分层算法流程如图 9 所示。

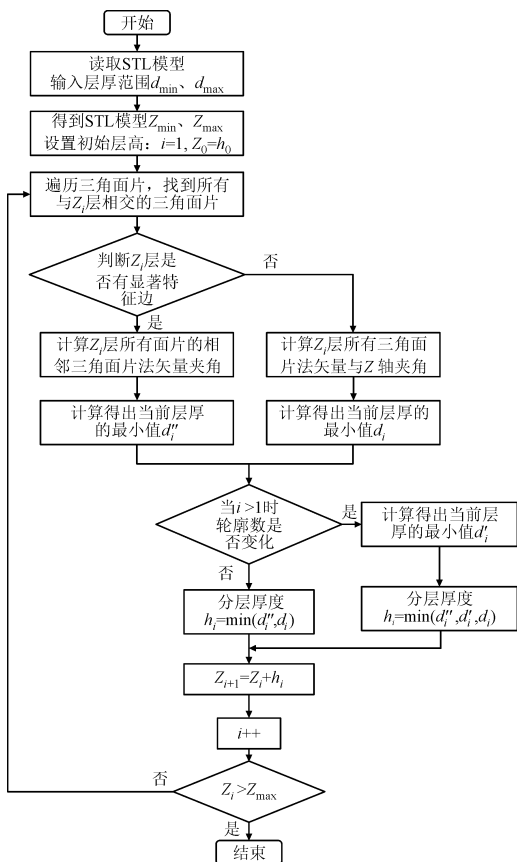


图 9 本文自适应分层算法流程

Fig. 9 Flow chart of adaptive slicing algorithm in the paper

步骤 1 读取 STL 模型并建立点表、面表之间的拓扑关系, 并输入打印层厚范围 $d_{\min}$ 和 $d_{\max}$ 。读取 STL 模型后得到关键信息, 根据公式 $Z_{\min} = \min(\min v_1(z_i), \min v_2(z_i), \min v_3(z_i))$, 得到 STL 模型在 Z 轴上的最低点, 然后根据公式 $Z_{\max} = \max(\max v_1(z_i), \max v_2(z_i), \max v_3(z_i))$, 得到 STL 模型在 Z 轴上的最高点, 其中 v_1 、 v_2 和 v_3 为 STL 模型三角面片的 3 个顶点。同

时, 设置初始层高度。

步骤 2 遍历三角面片, 找到与 Z_i 层相交的所有三角面片, 通过 2.2 小节中对模型显著特征边的识别方法, 判断 Z_i 层是否存在显著特征边。如果存在, 通过式(11) 计算自适应分层厚度 d'_i ; 如果不存在, 则计算当前层所有三角面片的法矢量与 Z 轴的夹角, 通过式(5) 计算出分层厚度 d_i , 将 $h_i = \min(d'_i, d_i)$ 作为当前分层厚度。

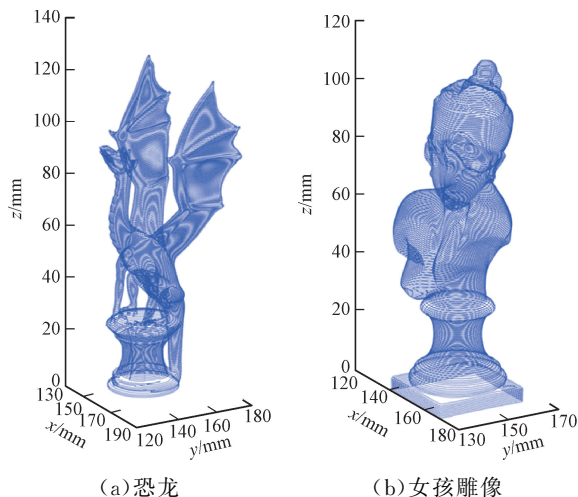
步骤 3 当 $i > 1$ 时, 根据式(8) 判断相邻切平面的轮廓数是否发生变化, 如果变化大于 0, 就表明相邻的切片面出现模型特征。为了避免这种畸变对模型的影响, 根据式(9) 计算分层厚度 d'_i , 将 $h_i = \min(d'_i, d_i, d_i)$ 作为当前分层厚度。

步骤 4 重新确定当前层厚 h_i , 则下一层 STL 模型的分层高度为 $Z_{i+1} = Z_i + h_i$ 。

步骤 5 判断当前分层平面高度 Z_i 是否超过 STL 模型高度 $Z_{\max}$ 。若超过则分层结束, 否则返回步骤 2 继续循环确定下一层分层高度。当 $Z_i > Z_{\max}$ 时, 输出一系列二维截面轮廓曲线集合, 程序结束。

3 仿真实验结果与分析

根据以上算法过程, 针对 STL 模型, 在 Windows10 系统上利用 MATLAB R2019b 对等层厚^[23-24]、基于三角面片法矢量的自适应分层算法^[25]、保留模型细节特征的自适应分层算法^[15]以及本文所采用的改进自适应分层算法进行了对比。选取平均阶梯高度 δ_{av} 作为模型精度的评价指标, 选取打印时间作为模型打印的效率指标。等层厚分层法选取 0.1 mm 和 0.5 mm 的层厚作为对比, 自适应分层法中的最小层厚 $d_{\min}$ 均设置为 0.1 mm, 最大层厚 $d_{\max}$ 均设置为 0.5 mm。图 10 给出了等层厚分层方法得到的恐龙



(a) 恐龙

(b) 女孩雕像

图 10 2 种模型等层厚分层效果图

Fig. 10 Equal thickness layering of two models

和女孩雕像模型效果图,从图中可以看出每一层分层厚度均一致,若分层厚度设置不合理,则会直接导致模型成型质量的下降。

图 11 和 12 分别为采用不同自适应分层法计算得到的恐龙和女孩雕像模型效果图,右边色阶对应于模型在不同位置处的分层厚度。通过对比发现,基于三角面片的自适应分层方法虽然能够减小阶梯

效应对模型的影响,但存在部分模型特征丢失的可能;而保留模型的细节特征的自适应分层方法虽然能够很好地识别模型特征细节,但是对于不存在模型特征的地方,分层厚度较大,会导致模型存在明显的阶梯效应。本文改进的自适应算法不仅考虑了阶梯效应对模型的影响,还考虑了模型特征丢失问题,相较于其他自适应算法,分层更加细腻。

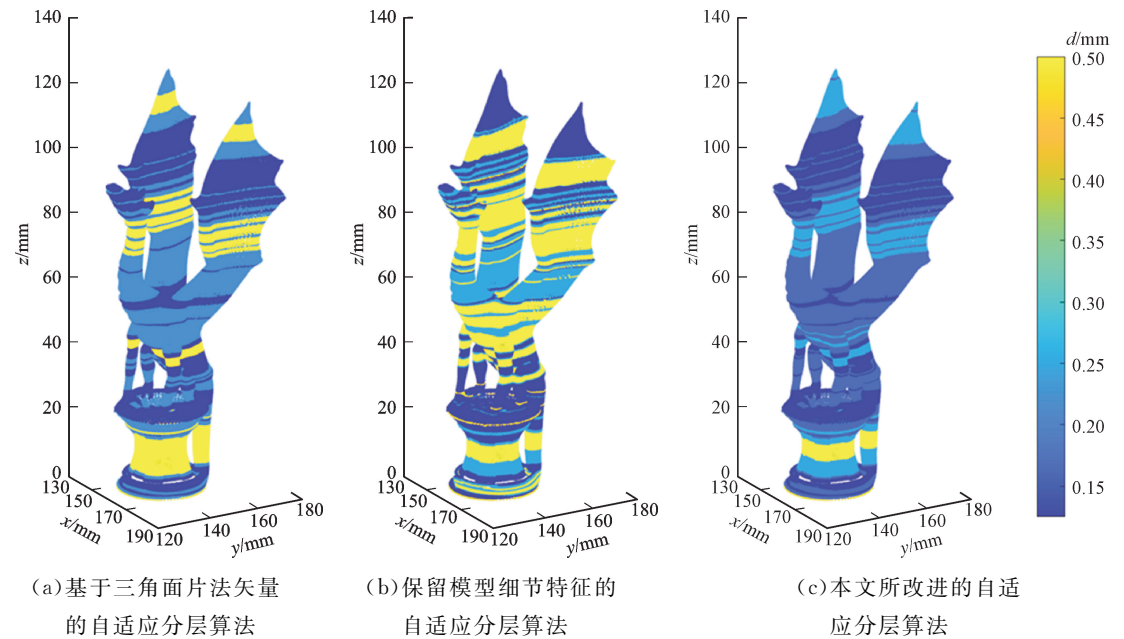


图 11 恐龙模型不同自适应分层算法对比图

Fig. 11 Dinosaur model adaptive layered comparison chart

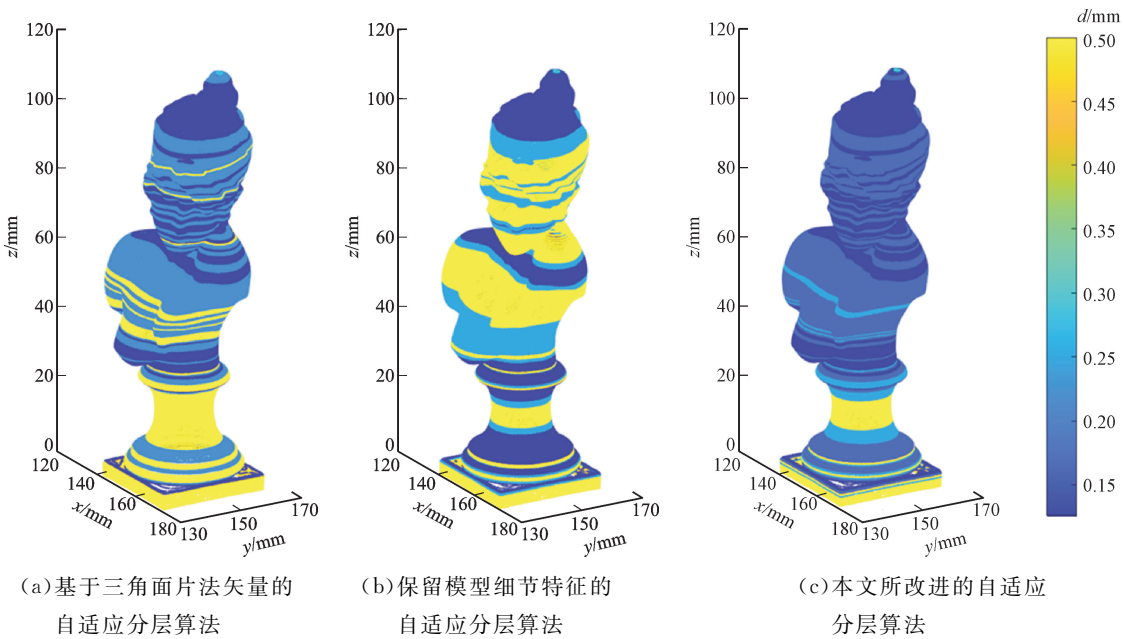


图 12 女孩雕像模型不同自适应分层算法对比图

Fig. 12 Girl statue model adaptive layered comparison chart

为了预估打印模型时长,设置打印喷头的移动速度为 70 mm/s,利用开源切片软件 PrusaSlicer 读取将 STL 模型进行不同分层处理后的 Gcode 指令文件,PrusaSlicer 软件预估的打印时长如表 1 所示。从表中可以看出,对于等层厚分层,当分层厚度为 0.1 mm 时,模型成型质量最高,对应的打印效率最低;当分层厚度为 0.5 mm 时,模型成型质量最差,但对应的打印效率最高。针对恐龙模型,本文改进的自适应分层算法相较于基于三角面片法矢量自适应分层法和保留模型特征的自适应分层法,精度分别提升了 28.6%和 31.7%,而打印时长仅增加了 7 min 和 11 min;对于女孩雕像模型,本文改进的自适应分层算法相较于基于三角面片法矢量自适应分层法和保留模型特征的自适应分层法,精度分别提升了 27.1%和 29.4%,打印时长仅分别增加了 13 min 和 17 min;对于比熊犬模型,本文采用改进的自适应分层算法相较于基于三角面片法矢量自适应分

层法和保留模型特征的自适应分层法,精度分别提升了 22.4%和 24.6%,而打印时长仅增加了 9 min 和 12 min。总而言之,本文改进的自适应分层算法相较于其他 2 种自适应分层算法,在显著提升模型成型质量的情况下,打印时间并没有很大的增加,因此相比于质量提升,打印效率的些许降低是可以接受的。

基于三角面片法矢量的分层算法能够减小阶梯效应,但对于三角面片法矢量与成型方向夹角为 90°的情况,由于阶梯效应不显著,故不能通过减小分层厚度保留模型细节特征,可能会导致模型特征的丢失和偏移;而保留模型特征的自适应分层算法,能够很好地保留模型细节,但在没有特征细节的地方,会存在明显的阶梯效应。本文方法综合考虑了阶梯效应以及模型细节丢失和偏移对模型成型质量的影响,将其他 2 种自适应分层算法的优点相结合,一定程度上提高了模型的成型质量。

表 1 不同模型的分层效果对比
Table 1 Comparison of layered effects of different models

模型	三角面片数	模型高度/mm	分层方法	层厚/mm	分层层数	阶梯高度 δ_{av} /mm	打印 耗时/min
恐龙	311 898	130.086 0	等层厚法	0.1	1 301	0.056	241
				0.5	261	0.456	49
			基于三角面片法矢量的自适应法	0.1~0.5	550	0.178	105
			保留模型特征自适应法	0.1~0.5	534	0.186	101
			本文方法	0.1~0.5	632	0.127	112
女孩雕像	281 724	110.664 0	等层厚法	0.1	1 107	0.061	218
				0.5	220	0.461	45
			基于三角面片法矢量的自适应法	0.1~0.5	469	0.181	92
			保留模型特征的自适应法	0.1~0.5	457	0.187	88
			本文方法	0.1~0.5	558	0.132	105
比熊犬	1 200 092	89.408 2	等层厚法	0.1	894	0.057	289
				0.5	178	0.468	66
			基于三角面片法矢量的自适应法	0.1~0.5	342	0.178	112
			保留模型特征的自适应法	0.1~0.5	337	0.183	109
			本文方法	0.1~0.5	378	0.138	121

4 结 论

本文在充分考虑模型精度影响因素的基础上,提出了一种改进的保留 STL 模型特征细节的自适应分层算法,将识别模型细节特征和模型特征偏移作为分层判别依据,在模型特征处自适应性地选取

最小分层厚度。改进后的自适应分层算法实现简单且算法时间复杂度较低,不仅能够减小阶梯效应所带来的误差,而且能防止模型特征细节的丢失或偏移,与基于三角面片法矢量的自适应分层算法和仅保留模型特征的自适应分层算法相比,成型质量更高,实用性更强。

参考文献:

- [1] 贺强,程涵,杨晓强. 面向 3D 打印的三维模型处理技术研究综述 [J]. 制造技术与机床, 2016(6): 54-57, 61.
HE Qiang, CHENG Han, YANG Xiaoqiang. A review of 3D model process technology oriented to 3D printing [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(6): 54-57, 61.
- [2] 娄平,尚雯,张帆. 面向 3D 打印切片处理的模型快速载入方法研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(6): 97-101.
LOU Ping, SHANG Wen, ZHANG Fan. Research on fast loading method of three-dimensional model for 3D printing slice processing [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 38(6): 97-101.
- [3] 雷聪蕊,葛正浩,魏林林,等. 3D 打印模型切片及路径规划研究综述 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(3): 24-32.
LEI Congrui, GE Zhenghao, WEI Linlin, et al. Review of 3D printing model slicing and path planning research [J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(3): 24-32.
- [4] SIKDER S, BARARI A, KISHAWY H A. Global adaptive slicing of NURBS based sculptured surface for minimum texture error in rapid prototyping [J]. Rapid Prototyping Journal, 2015, 21(6): 649-661.
- [5] TAUFIK M, JAIN P K. Laser assisted finishing process for improved surface finish of fused deposition modelled parts [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 30: 161-177.
- [6] MAO Huachao, KWOK T H, CHEN Yong, et al. Adaptive slicing based on efficient profile analysis [J]. Computer Aided Design, 2019, 107: 89-101.
- [7] PAN Xiaodi, CHEN Kun, CHEN Dingfang. Development of rapid prototyping slicing software based on STL model [C]//Proceedings of the 2014 IEEE 18th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 191-195.
- [8] 陈昆,潘小帝,陈定方. 一种快速成型自适应分层算法 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2014, 38(3): 547-551.
CHEN Kun, PAN Xiaodi, CHEN Dingfang. An adaptive slicing algorithm of rapid prototyping [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2014, 38(3): 547-551.
- [9] LI Hongbin, WANG Taiyong, SUN Jian, et al. The adaptive slicing algorithm and its impact on the mechanical property and surface roughness of freeform extrusion parts [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2016, 11(1): 27-39.
- [10] 周惠群,吴建军. 基于 STL 模型的轮廓线自适应分层方法研究 [J]. 机械与电子, 2015(8): 14-17.
ZHOU Huiqun, WU Jianjun. Study on the method of adaptive slicing contour line based on STL model [J]. Machinery & Electronics, 2015(8): 14-17.
- [11] 林洁琼,王一博,靖贤,等. 增材制造中 STL 模型的自适应分层算法研究 [J]. 机械设计与制造, 2018(2): 51-53, 57.
LIN Jieqiong, WANG Yibo, JING Xian, et al. Research on adaptive slicing algorithm of STL model in additive manufacturing [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(2): 51-53, 57.
- [12] 田仁强,刘少岗,张义飞. 增材制造中 STL 模型三角面片法向量自适应分层算法研究 [J]. 机械科学与技术, 2019, 38(3): 415-421.
TIAN Renqiang, LIU Shaogang, ZHANG Yifei. Research on adaptive layering algorithm of triangular facet normal vector of STL model in additive manufacturing [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(3): 415-421.
- [13] WANG Huabing, LIU Weijun, BIAN Hongyou. Facet normal vector based adaptive slicing algorithm [C]//2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: V6-107-V6-110.
- [14] LÜ Ning, OUYANG Xuefeng, QIAO Yujing. Adaptive layering algorithm for FDM-3D printing based on optimal volume error [J]. Micromachines, 2022, 13(6): 836.
- [15] 王军伟,陈兴,邓益民,等. STL 模型特征信息的自适应分层的研究 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(6): 244-251.
WANG Junwei, CHEN Xing, DENG Yimin, et al. Research on adaptive layering of feature information of STL model [J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(6): 244-251.
- [16] 韩江,王德鹏,夏铤,等. 防止 3D 打印模型特征偏移的自适应分层方法 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(1): 1-6.
HAN Jiang, WANG Depeng, XIA Lian, et al. Adaptive slicing algorithm for preventing feature offset of 3D printing model [J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2020, 43(1): 1-6.
- [17] NAVANGUL G, PAUL R, ANAND S. Error minimization in layered manufacturing parts by stereolithography file modification using a vertex translation

- algorithm [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2013, 135(3): 031006.
- [18] 徐敬华, 盛红升, 高铭宇, 等. 基于环形邻域的增材制造分层自适应正向设计方法[J/OL]. *计算机集成制造系统*: 1-18[2022-08-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20211231.1458.002.html>.
XU Jinghua, SHENG Hongsheng, GAO Mingyu, et al. Adaptive forward design for slicing of additive manufacturing based on ring neighborhood[J/OL]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*: 1-18[2022-08-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20211231.1458.002.html>.
- [19] 朱敏, 党元清, 高思煜, 等. 利用面片法向量保留模型特征的3D打印自适应分层算法[J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(8): 50-58.
ZHU Min, DANG Yuanqing, GAO Siyu, et al. An adaptive slicing algorithm for 3D printing using facet normal vector to preserve model features [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(8): 50-58.
- [20] SZILVSI-NAGY M, MÁTYÁSI G Y. Analysis of STL files [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2003, 38(7/9): 945-960.
- [21] WEN Hao, GAO Jian, WU Richeng, et al. Research on direct topological structure reconstruction for STL model [C]//2020 21st International Conference on Electronic Packaging Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 1-6.
- [22] PANDEY P M, REDDY N V, DHANDE S G. Real time adaptive slicing for fused deposition modelling [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43(1): 61-71.
- [23] MINETTO R, VOLPATO N, STOLFI J, et al. An optimal algorithm for 3D triangle mesh slicing [J]. *Computer-Aided Design*, 2017, 92: 1-10.
- [24] GREGORI R M M H, VOLPATO N, MINETTO R, et al. Slicing triangle meshes: an asymptotically optimal algorithm [C]//2014 14th International Conference on Computational Science and Its Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 252-255.
- [25] WASSERFALL F, HENDRICH N, ZHANG Jianwei. Adaptive slicing for the FDM process revisited [C]//2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 49-54.

(编辑 李慧敏 刘杨)