FDM 三维打印的支撑结构的设计算法

陈岩, 王士玮, 杨周旺, 刘利刚*

中国科学技术大学数学科学学院, 合肥 230026

* 通信作者. E-mail: lgliu@ustc.edu.cn

收稿日期: 2014-08-22; 接受日期: 2014-12-17; 网络出版日期: 2015-01-21

国家自然科学基金优秀青年基金 (批准号: 61222206)、国家自然科学基金 (批准号: 11171322)、中国科学院百人计划和国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划)(批准号: 11171322) 资助项目

摘要 熔融挤压式 (FDM) 三维打印是由熔化的塑料丝沉积组成物体模型的过程. 熔化的塑料丝由喷嘴喷出并与喷嘴正下方的物体模型融合. 然而, 塑料丝只能沉积在已经存在的物体的上表面上. 因此, 需要在物体悬空的部位下方添加支撑结构使得物体能够被打印, 否则塑料丝将悬在空中无法沉积, 不能成型. 本文设计并实现了一种保证三维物体模型能够打印的支撑结构方法. 能够自动寻找支撑点, 并且自动寻找添加支撑结构杆. 此外, 还调整了支撑杆的具体结构以增加稳定性以及易于剥除性. 相比一般切片引擎如 Cura, MeshMixer 的处理方法, 文中提出的算法能够在确保可打印性的前提下, 有效减少三维打印的材料和时间消耗.

关键词 三维打印机 FDM 打印机 支撑结构 三维模型 几何建模

1 引言

三维打印, 是快速成型技术的一种, 是一种以数字模型文件为基础, 运用粉末状金属或塑料等可粘合材料, 通过逐层打印的方式来构造物体的技术.

三维打印通常是采用数字技术材料打印机来实现的. 目前存在着许多不同的三维打印技术. 它们的不同之处在于使用的材料及打印的方式. 有些技术利用熔化或软化可塑性材料的方法来制造打印“墨水”, 例如: 选择性激光烧结 (selective laser sintering, SLS) 和熔融挤压 (fused deposition modeling, FDM), 还有一些技术是用液体材料作为打印“墨水”, 例如: 立体平板印刷 (stereolithography, SLA) 和分层实体制造 (laminated object manufacturing, LOM). 每种技术都有各自的优缺点, 一般来说, 主要考虑因素是打印的速度和成本、三维打印机的价格、物体原型的成本, 还有材料以及色彩的选择和成本.

使用三维打印机打印三维物体模型的主要流程是: 使用者先通过计算机建模软件建模; 再利用切片引擎软件将建成的三维模型“分区”成逐层的截面, 即切片; 最后让三维打印机读取切片信息, 并执行打印.

熔融挤压 (FDM) 型三维打印机一般以热塑性材料, 如 PLA 塑料、ABS 塑料、尼龙等为打印原料, 这种打印机价格便宜且被广泛使用. 打印时以丝状供料, 材料在喷头内被加热熔化. 喷头沿零件截面

引用格式: 陈岩, 王士玮, 杨周旺, 等. FDM 三维打印的支撑结构的设计算法. 中国科学: 信息科学, 2015, 45: 259–269, doi: 10.1360/N112014-00230

轮廓和填充轨迹运动, 同时将熔化的材料挤出. 材料迅速冷却凝固, 并与下方的模型 (或打印底板) 融合构成模型的形状. 打印机在打印底板上, 从三维物体模型的底部开始, 一层一层连续地打印至顶部.

由于 FDM 型三维打印机打印原理类似于简单的“堆积木”, 在打印物体模型中的悬空部位时, 被挤出的塑料丝悬在空中而无法融合. 用户需要在切片前对物体模型悬空部位下方添加支撑结构. 这些支撑结构作为物体模型的一部分被打印机打印. 这样在打印悬空部位时塑料丝能够与下方的支撑结构凝结. 支撑结构在打印结束后需要被人为剥除, 这会对物体模型表面造成损伤. 因而应在确保打印成功的前提下, 尽可能的减少支撑结构总体积 (减少耗材) 和支撑结构与物体表面接触的面积 (减少剥除时的损伤).

如何合理地添加支撑结构, 是 FDM 型三维打印机要面对的十分重要的问题. 支撑算法的首要目的是确保能够正常且完整地打印三维物体模型. 因此可以归纳为两个主要问题:

(1) 如何寻找需要添加支撑的部位?

(2) 如何添加支撑结构?

对于第一个问题, 主要是确保物体模型中所有需要支撑的部位都被添加支撑. 对于第二个问题, 一方面, 添加的支撑结构应确保能够支撑相应的部位; 另一方面, 支撑结构需要在打印后能够轻松地、从物体中剥除并且尽量减少对物体表面的损耗.

现在已有许多方法处理这两个问题. 在寻找支撑部位方面, 一种方法是选取三维物体模型中所有外法向朝下且与水平面夹角较小的面 (即接近水平的面) 作为需要添加支撑的部位^[1,2]. 现有的许多切片引擎如 Cura¹⁾, MeshMixer²⁾等均采用这种方法. 但是这种方法有可能会忽略一些悬空的位置. 另一种方法是对两个连续切片层作布尔差分^[3~5]. 这通常会得到一个紧集以表示需要支撑的点. Eggers 和 Renap^[6] 通过向下采样选取了一个子集. 在添加支撑结构方面, 一种做法是在所需表面下方挤出支撑, 而支撑的结构通常为稀疏密度的网格^[7]. Cura 切片引擎使用了这种方法, 该方法虽然支撑稳定性好但浪费材料. 而另一种方法是在所需支撑点下方生成树状支撑^[8,9]. MeshMixer 使用了这种方法, 但是这种方法生成的支撑结构在打印时稳定性不太好. Wang 等^[10] 优化了物体的框架结构以加强对象的三维打印模型, 并拓展了一种支撑生成方法, 支撑柱在物体表面上寻找合适的基点添加. 本文算法对第二个问题的处理是基于此方法的改进.

本文设计并实现了一种生成三维物体模型的支撑方法. 首先提出一个支撑参数以帮助自动寻找支撑点, 进而自动寻找出一个支撑点集, 之后在支撑点下方自动寻找添加支撑结构杆, 并对杆的结构做出了调整以便于在打印完成后从物体表面剥离. 这种生成支撑结构的方法, 能够保证三维打印过程的稳定性, 并能减少去除支撑结构后给模型带来的损伤以及减少材料的浪费.

2 支撑算法介绍

支撑算法可以归纳为两个部分: 寻找需要添加支撑的部位以及添加支撑结构.

2.1 寻找添加支撑的部位

首先我们需要寻找三维物体模型中所有不可打印的部位作为需要添加支撑的部位. 对于不同的物体表面结构, 三维打印时材料的沉积粘滞效果不同. 较为水平的部分 (即倾斜度较大的部分) 粘滞效果较差, 不能很好地被物体模型自身支撑; 反之, 垂直的部分可以很好地被支撑. 因此, 物体表面中较为

1) Ultimaker: Cura. <http://www.ultimaker.com/>.

2) AUTODESK: Meshmixer. <http://www.meshmixer.com/>.

图 1 金牛模型需要添加支撑区域的检测示意图

Figure 1 The detection of the area that needs to be supported on a Taurus model: the red area could be considered as the result

水平的部位可以被认为是需要添加支撑的部位. 此外, 物体中悬空的部位也应当被认为是需要添加支撑的部位, 如图 1. 大部分关于支撑结构的工作, 包括 Cura, MeshMixer 等常见的切片引擎中所用的算法, 都是通过比较三维物体网格模型中每个面或边的倾斜角与一个用户指定的角度的大小来计算需要支撑的区域, 所有倾斜角过大的面或边被判断为需要支撑的区域. 其中部分算法会在所得区域上采样得到采样点集来替代支撑区域. 这样的做法尽管简单易行, 但有些情况下无法检测出一些需要支撑的部位 (如“尖下巴”部位). 因而我们需要改进判断的依据.

经过大量实验和测试, 本文发现出一系列规律并提出一个支撑参数来衡量物体表面的某一点是否需要添加支撑. 算法的思想是先将三维物体的网格模型当做一个连续的三维曲面, 并为曲面上的每个点赋予一个支撑参数 L , 用以衡量在打印过程中模型表面自身上该点的支撑效果, 参数值越大说明该点在打印时越稳定. 当某一点的支撑参数值低于一个临界值时, 便将它作为需要添加支撑的点. 这样设计的目的在于: 应对同一几何形状不同拓扑的情形, 我们希望能够得到相近的解.

然而, 在实际的计算机存储中, 三维物体模型是离散的网格模型. 因此, 需要在实际操作中考虑离散的情形. 注意到, 一个三维物体模型可能由不同的网格结构表达——简化的或复杂的. 这些网格模型有着相似的形状, 我们需要保证算法结果的相似性. 因此, 我们对输入的三维网格模型 M 采样, 得到一个采样点集 S . 打印材料具有粘滞性, 当采样足够密时, 支撑效果可以覆盖所有的需要支撑的位置. 然后为 S 中的每一个点 p 赋予一个支撑参数 $L(p)$. $L(p)$ 的数值越大, 表示点 p 处的已被支撑的程度越高; 当 $L(p)$ 的值较小时, 就说明在点 p 处需要添加额外的支撑结构. 将其标记为需要添加支撑结构的点后, 将 $L(p)$ 设成给定的参数最大值 $L_{\max}$; 模型的悬空部分由于没有被模型自身所支撑, 其支撑参数为 0. 通过依次计算每个点的 $L(p)$ 参数, 可以得出需要添加支撑的点集 P , 其算法与关键步骤如算法 1 所示.

重采样 同一个三维模型可能由不同的网格结构表达, 而一个三维模型需要添加支撑的部位应该是一定的, 因此, 需要先对三维模型进行重采样. 重采样的对象是需要三维打印的模型, 则重采样应该与三维打印相适应. 三维打印, 首先要进行“层层切片”(用一系列垂直于 Z 轴的水平面与模型求交), 得到一层一层的轮廓线, 相邻两层之间的距离一般为 $0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$; 而本文的重采样是直接在这些轮廓线上进行的. 对一条轮廓线进行采样, 只需保证相邻的采样点不超过 0.4 mm 即可. 本文的采样方法是, 对于当前点, 沿着轮廓线找与它距离为 0.4 mm 的下一个点, 作为新的采样点, 循环迭代, 直至找不到下一个点. 此处的 0.4 mm 是与三维打印机有关的经验值, 一般设为三维打印机在水平精度上的 $2 \sim 4$ 倍. 每求得一个采样点 p , 都需要求邻域 $N(p)$, 即在 p 的下方取测地距离最近的至多 6 个点作

算法 1 寻找需要添加支撑的部分**输入:**给定的三维网格模型 M ;给定的支撑能量参数的临界值 $L_{\min}$ 与 $L_{\max}$;**输出:**需要添加支撑的点集 P ;

```

1: 对离散的三维网格模型  $M$  进行重采样, 得到点集  $S$ ;
2: 将点集  $S$  中的点按  $z$  坐标值由低到高进行排序, 得到队列  $Q$ ;
3: 点集  $B = \emptyset$ ;
4: 点集  $P = \emptyset$ 
5: while  $Q \neq \emptyset$  do
6:   从  $Q$  中取出当前队首  $p$ ,  $p$  的  $z$  坐标值为  $Q$  中最小;
7:    $Q = Q/p$ 
8:   依据式 1 计算  $p$  的支撑能量参数  $L(p)$ ;
9:   if  $L(p) < L_{\min}$  then
10:     $P = P \cup \{p\}$ ;
11:     $L(p) = L_{\max}$ ;
12:   end if
13:    $B = B \cup \{p\}$ ;
14: end while
15: return  $P$ ;

```

为其邻域.

给定 $L_{\max}$ 和 $L_{\min}$ $L_{\max}$ 表示基面上的点或者添加额外支撑结构后的点的 $L(p)$ 值; 而 $L_{\min}$ 则表示支撑能量下界, 若低于该值, 则说明该点需要被支撑. $L_{\max} = 20, L_{\min} = 10$ 是一个比较不错的经验值.

基面 找出 S 中 z 坐标最低的点 p_0 , 将其所在平面记为基平面 P_{base} , 所有在 P_{base} 上的点记为 S_{base} .

$L(p)$ 的取值 支撑能量参数 $L(p)$ 是一个向上传递并不断衰减的函数, 它用来描述点 p 被支撑的程度. 若 p 点为悬空点, 则 $L(p) = 0$; 若模型上的点 p 不是悬空点, 则会被其下方相邻的点所支撑, 其下方的这些点会向 p 贡献它的支撑能量, 而该能量在传递的过程中会由于倾角、长度和材料等原因发生衰减. 在本文算法中, 取这些能量中的最大值作为点 p 的函数值.

$$L(p) = \begin{cases} L_{\max}, & \text{if } p \in S_{\text{base}}, \\ \max\{\max_{q.z < p.z \& q \in N(p)} \{L(p) - l_{pq}\theta_{pq}\alpha\}, 0\}, & \text{其他,} \end{cases} \quad (1)$$

其中, l_{pq} 为 pq 的长度, θ_{pq} 为 pq 与水平面的夹角, α 为传递系数. 可由以下数值表示:

$$\alpha = \alpha_0 \beta H, \quad (2)$$

其中, H 为模型的整体高度, β 为材料系数, α_0 为用户设定的修正系数.

计算完成后即得到需要添加支撑的点集 P .

2.2 添加支撑结构

在计算出需要添加支撑的点集 P 后, 需要在 P 中点的下方添加支撑结构以支撑物体表面. 现行的几款切片引擎中, Cura 的做法是在所需支撑区域下方挤出稀疏密度的网格支撑, 这种方法支撑稳定

算法 2 添加支撑结构**输入:**三维模型点集 S ; 需要支撑的点集 P ;**输出:**表示支撑结构杆的边集 E ;

```

1:  $E = \emptyset$ ;
2: for  $p \in P$  do
3:   令  $K = \{q | q.z < p.z\}$ , 并对  $K$  中的点按照与  $p$  的距离由近到远排序, 记作  $K = \{q_1, q_2, \dots, q_k\}$ ;
4:   令  $\text{Flag} = \text{false}$ ;
5:   for  $i = 1$  to  $k$  do
6:     if  $q_i$  与  $p$  相连的边的倾角与边长满足图 2 所示的关系 then
7:        $q = q_i$ ;
8:        $\text{Flag} = \text{true}$ ;
9:       break;
10:    end if
11:  end for
12:  if not  $\text{Flag}$  then
13:    令  $q$  为  $p$  正下方基面上的投影点;
14:  end if
15:  连结  $p$  和  $q$ , 标记为边  $e_{pq}$ ;
16:   $E = E \cup e_{pq}$ ;
17: end for
18: 支撑结构的精简;
19: return  $E$ ;

```

性好但浪费材料, 并且不易剥除; MeshMixer 的做法是在所需支撑点下方生成树状支撑, 这种方法生成的支撑结构在打印时稳定性不太好. 本文采用一种折中的方案: 在所需支撑点下方生成立方柱状支撑结构, 并做一些改进处理, 即对每个 $p \in P$, 寻找一个支撑基点 q , 并生成一个以 p, q 为顶点的支撑杆. 选取规则为: 选则物体表面网格中在 p 下方并使得连接两点的支撑柱可打印的最近的顶点 q 作为支撑基点. 若在网格中不存在这样的顶点, 则选取底面 P_{base} 上处于 p 正下方的点 q 作为支撑基点. 其算法与关键步骤如算法 2 所示. 支撑柱可打印性与其长度和倾斜角度有关, 支撑柱的倾斜角度越小, 可打印的最大长度越长 (这个选取规则改进自文献 [10]). 我们在 T-50 型三维打印机上采用聚乳酸材料 (PLA) 测试了支撑杆的可打印长度和倾斜角的关系, 如图 2.

支撑的精简 物体模型的形状千变万化, 对于一些三维物体模型, 算法会生成的一些不必要的支撑, 如图 3 左中红色部分.

观察结果不难发现, 多余的支撑可以分为以下两种情形: 部分支撑过短或贴附于物体的表面; 部分支撑完全落在物体内部. 前者不但对增加物体的打印稳定性帮助不大, 而且与物体模型自身接触面积非常大, 在剥除支撑时可能会破坏物体本身的结构, 影响成品的外观, 因而剔除. 至于后者, 在打印时通常会选择在物体内部添加填充结构 (这部分工作可由切片引擎完成). 这个步骤主要是为了增强三维物体模型自身的硬度, 同时这些填充结构本身也会对物体内部起到支撑作用. 模型内部的支撑结构与填充结构功能重合, 会造成材料的浪费, 故我们也将它剔除.

支撑算法执行完成后, 得到了一个良好的支撑结果, 如图 3(b). 执行本算法时, 计算支撑能量参数时间复杂度为 $O(K^2)$, 其中 K 为采样点的个数. 而添加支撑结构的时间复杂度为 $O(n \times m)$, 其中 m 为所需支撑点的个数 (不会超过 K), n 为模型节点个数. 故时间消耗主要在对采样点的支撑能量参数

图 2 支撑柱可打印的最大长度与倾斜度的关系 (θ 为支撑柱与 z 轴夹角, $p(\theta)$ 为支撑柱可打印的最大长度). 不同型号的打印机或者不同的打印材料可能有不同的选取依据

Figure 2 Relationship between the printable maximum length and the tilt of the supports, where θ is the angle between the supports and the z -axis and $p(\theta)$ is the maximum length. Result might different in different printer

图 3 精简前后的支撑对比: (a) 精简前, 红色加粗显示的支撑是不必要的支撑; (b) 精简后, 删除红色支撑, 仅剩下必要的支撑 (蓝色加粗显示)

Figure 3 The supports after the reduction compare to the initial one. (a) Before the reduction; (b) after the reduction

计算上, 算法时间复杂度为 $O(K^2)$.

2.3 支撑柱结构的优化

通过反复实验, 本文还总结出一些经验.

首先, 当成品被打印出来后, 需要将支撑结构剥除. 由于本算法生成的支撑柱仅仅是简单立柱, 其与物体表面的接触面积较大, 难以剥除. 可以适当地将支撑柱与物体表面接触的部位削尖, 即在立柱在端点处为一个梯柱 (图 4). 虽然这样做能节省的材料可忽略不计, 且会少量减少支撑结构的稳定性. 但是为了能够便于剥除, 这样的改进是有必要的.

其次, 支撑柱自身的稳定性随着长度的增加而较少. 为了增加稳定性, 本文使支撑柱的宽度与其长度正相关. 并通过实验总结出一个经验公式:

$$w = 1 + l/30,$$

其中, w 为支撑柱宽度 (单位: mm), l 为支撑柱长度 (单位: mm).

图 4 支撑柱的削尖

Figure 4 Sharpen the ends of the support structure

图 5 利用本文算法得到的一些模型的支撑结构的结果

Figure 5 Examples with the supports generated from our algorithms: (a) Bird; (b) Human1; (c) Cow; (d) Human2; (e) Horse; (f) Dinosaur

此外, 对于连接底边面的支撑柱, 我们将其底部加粗, 形成底座, 以增加支撑稳定性.

3 实验结果展示

本文对不同的模型执行本算法生成了支撑结构并比较分析它们的效果, 所有的支撑都是自动添加的. 图 5 展示了 6 种不同模型的模拟结果. 所有模型都是在 T-50 型三维打印机上采用通常使用的聚乳酸材料 (PLA) 并以 40 mm/s 的打印速度, 150 mm/s 的移动速度, 0.25 mm 的层高执行打印. 图 6 展示了其中三种模型的实际打印结果. 对于其他类型的打印机或材料, 其打印结果可能会不同, 可以通过调整式 (1) 中的传递系数 α 来获得满意的结果.

图 6 模型的打印结果照片

Figure 6 Printed examples with the supports generated from our solution. (a) Horse (80 mm); (b) Cow (80 mm); (c) Dinosaur (50 mm)

图 7 不同算法生成的恐龙模型 (高 50 mm) 的支撑结构的对比. (a) 文中算法的结果; (b) Cura 算法的结果; (c) Meshmixer 算法的结果. 第一行为模拟结果, 第二行为打印的实物

Figure 7 Comparisons of printed dinosaur models (height 50 mm) with supports generated by different algorithms. (a) Our algorithm; (b) Cura; (c) Meshmixer. The upper row shows the simulation results and the lower row shows the printed objects

我们对图 5 中的模型比较了文中算法和 Cura, Meshmixer 两款切片引擎自带的支撑生成算法的效果, 两种切片引擎的支撑生成算法均采用默认的设置 (支撑角度为 60 度). Cura 会检测出需要添加的区域并在下方生成网格状的支撑, 而 Meshmixer 则检测出一个需要添加支撑的点集部位, 并聚类生成树桩支撑. 图 7 和图 8 分别展示了恐龙模型及牛模型在本文算法, Cura 算法以及 Meshmixer 算法下生成支撑结构的模拟结果或模型实际打印结果. 我们主要从成本消耗, 打印稳定性以及剥除时对物体模型的损害三个方面比较算法的效果.

在成本消耗方面, 表 1 和表 2 对比展示了这些模型在打印时用不同算法的时间消耗和材料长度消耗. 从表中不难算出, 相比于 Cura, 本文算法平均减少 14% 的时间消耗和 23% 的材料消耗. 相比于 Meshmixer, 各有 3 个模型在时间和材料耗费上占有优势, 总体持平.

在打印稳定性方面, 本文算法和 Cura 的结果较为稳定, 能够比较不错的支撑起三维物体模型. 但

图 8 牛模型的对比结果 (高 60 mm): (a) 文中算法打印结果; (b) Cura 算法打印结果, 支撑面积大而难以剥除; (c) Meshmixer 算法打印结果, 产生了一条很难打印且无支撑帮助的杆, 稳定性不好.

Figure 8 Comparison of a printed cow model generated by (a) our solution, (b) Cura and (c) Meshmixer

表 1 三种算法的打印时间和耗材长度比较表

Model	Cura		Meshmixer		Our solution	
	Time (min)	Material (m)	Time (min)	Material (m)	Time (min)	Mmaterial (m)
Bird	56	1.22	50	1.00	46	0.83
Human1	71	1.43	59	1.16	57	1.07
Cow	170	4.27	167	3.92	168	3.87
Human2	120	2.39	89	1.68	101	1.97
Horse	56	1.24	49	0.99	44	0.86
Dinosaur	50	1.18	41	0.75	46	0.90

表 2 本算法与 Cura, MeshMixer 节省比较

Model	Cura		MeshMixer	
	Saved time (%)	Saved material (%)	Saved time (%)	Saved material (%)
Bird	17.85	31.97	8.00	17.00
Human1	19.71	25.17	3.39	7.76
Cow	1.18	9.37	-0.60	1.28
Human2	11.67	13.39	-13.48	-17.26
Horse	21.43	30.65	10.20	13.13
Dinosaur	8.00	12.71	-12.20	-20.00

Meshmixer 的结果稳定性较差, 在我们的实验中, 每 2 次才能成功一次 (模型体积越大, 成功率越低), 需要有经验的人经过大量的参数调试才能提高成功率.

而在剥除支撑后对物体表面的损害方面, 由于在生成支撑时削尖了支撑与物体接触的部位, 本文算法生成的支撑与物体模型接触面积很小. 较小的接触面积意味着对物体较小的破坏, 故本文算法生成的支撑对物体模型表面损害较小. Meshmixer 的情况与本文算法差不多. 但 Cura 生成的支撑与物体接触面积较大, 会对物体表面有着较大的破坏.

故总的来说, Cura 稳定但消耗成本高且破坏物体表面, Meshmixer 则打印稳定性较差. 本文算法

相比 Cura 减少了时间和材料消耗, 同时又不失打印稳定性, 拥有成本低、稳定性好并减少破坏物体表面的优点.

4 总结与展望

三维打印是时下非常热门的研究领域, 其中三维物体模型的支撑问题是一个亟需解决的难题. 研究者们提出了很多方法来解决此问题.

本文提出并实现了一种自动生成三维打印支撑的算法. 主要贡献在于, 文中算法能够自动寻找需要添加支撑的点以及自动添加支撑杆. 此外, 还优化了支撑杆的结构以便于支撑杆在打印后易于从物体表面剥除. 相比与 Cura 软件的支撑算法, 文中的算法生成的结果能够节约了打印耗时和材料消耗, 并能够保证模型的顺利打印. 而相比于 Meshmixer 则在打印稳定性方面有很大的提升.

但本算法仍有许多不足之处: 第一, 目前无法自动选取支撑传递参数, 仅能通过实验估算出大致的参考值. 第二, 支撑端部的结构仍需要改进以减少与物体表面的接触面积以减少剥除时的破坏. 第三, 有时算法会产生两头连接物体的且较长的支撑杆, 这种杆稳定性极差 (因为下端被削尖了), 应避免这种情况.

未来作者将着手研究并解决上面中提到的几个问题. 其一, 我们将测试更多的结果以获得更准确的支撑传递参数以及合适的支撑端部结构; 其二, 改进算法以减少产生两端均连接模型表面的支撑的可能性; 最后, 我们将实现更友好的用户交互系统, 以提升用户体验并便于测试.

参考文献

- 1 Allen S, Dutta D. Determination and evaluation of support structures in layered manufacturing. *J Des Manuf*, 1995, 5: 153–162
- 2 Alexander P, Allen S, Dutta D. Part orientation and build cost determination in layered manufacturing. *Comput-Aid Des*, 1998, 30: 343–356
- 3 Allison J W, Chen T P, Cohen A L, et al. Boolean layer comparison slice. US Patent, 1994, 5321622, 1994–6–14
- 4 Chalasani K, Jones L, Roscoe L. Support generation for fused deposition modeling. In: *Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, 1995. 229–241
- 5 Huang X, Ye C, Mo J, et al. Slice data based support generation algorithm for fused deposition modeling. *Tsinghua Sci Technol*, 2009, 14: 223–228
- 6 Eggers G, Renap K. Method and apparatus for automatic support generation for an object made by means of a rapid prototype production method. US Patent Application, 12/682488, 2008–10–10
- 7 Strano G, Hao L, Everson R M, et al. A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing. *Int J Adv Manuf Technol*, 2013, 66: 1247–1254
- 8 Gothait H, Kritchman E, Miller G. System and method for printing and supporting three dimensional objects. US Patent, 7364686, 2008–4–29
- 9 Vanek J, Galicia J, Benes B. Clever support: efficient support structure generation for digital fabrication. *Comput Graph Forum*, 2014, 33: 117–125
- 10 Wang W, Wang T Y, Yang Z, et al. Cost-effective printing of 3D objects with skin-frame structures. *ACM Trans Graph*, 2013, 32: 177

Construction of support structure for FDM 3D printers

CHEN Yan, WANG ShiWei, YANG ZhouWang & LIU LiGang*

School of Mathematical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

*E-mail: lgliu@ustc.edu.cn

Abstract In this paper, we present a method for automatically generating support structures for fabricating 3D objects with fusion deposition modeling (FDM) printers. First, we search for the parts of the 3D object model that cannot be printed normally (called unprintable parts). Then, we add some necessary support structures to all those parts. These support structures connect those unprintable parts to the object itself, or to the bottom plane. In addition, the support structure is corrected to increase stability while printing the object. For models of different sizes, we can adjust the density and width of the support structures in order to ensure stability and reliability in the printing process. Compared with existing methods, our method can reduce material cost and computation time.

Keywords 3D printers, FDM printers, support structure, 3D meshes, geometry modeling

CHEN Yan was born in 1991. He received the B.S. degree in mathematics from the University of Science and Technology of China in 2014. He is currently a graduate student at the University of Science and Technology of China. His research interests include geometry processing, computer graphics, and 3D printing.

LIU LiGang was born in 1975. He received the Ph.D. degree in computer graphics from Zhejiang University, Hangzhou, in 2001. Currently, he is a professor at the School of Mathematical Sciences, University of Science and Technology of China. His research interests include geometric processing, computer graphics, and image processing.