

基于 STL 文件的柱状支撑结构 自动生成算法

宋廷强, 刘亚林, 张敏

(青岛科技大学 信息科学技术学院, 山东 青岛 266061)

摘要: 熔融挤压三维打印以热塑性材料为原料逐层打印完成, 由于熔丝只能沉积在已存在的物体上层, 模型悬空部位需要添加支撑结构; 为解决该问题, 提出一种基于 STL (stereo lithography) 文件的稀疏柱状支撑结构自动生成算法; 算法通过对比三角面片倾斜角度与模型临界角的大小, 获取独立的待支撑区域, 然后基于边长自适应法和射线与面片相交法得到待支撑点集, 自动生成支撑结构; 此外为了保证模型表面质量和支撑结构的稳定性, 支撑结构不在模型表面生成; 调整支撑结构形状, 进一步提高支撑结构的稳定性; 通过实验证明本文算法比 Cura 软件节约 15% 的材料消耗, 支撑结构更容易剥离, 模型表面质量更好。

关键词: 三维打印; STL 模型; 支撑结构; 快速成型; 自动生成算法

Automatic Generation Algorithm of Cylindrical Support Structure Based on STL File

Song Tingqiang, Liu Yalin, Zhang Min

(1. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Fused deposition modeling 3D printing thermoplastic material as a raw material layer by layer print completed, because the fuse can only be deposited on the existing objects in the upper part of the model need to add support structure hanging parts. To solve this problem, an automatic support structure generation algorithm based on STL (Stereo Lithography). Algorithm to obtain an independent area to be supported, based on the edge-length adaptive method and ray and patch intersection method to be supported point set to automatically generate the support structure. In addition, the support structure is prevented from growing on the surface of the model and the shape of the support structure is adjusted. Experiments show that the proposed algorithm saves 15% of the material consumption compared with Cura software, the support structure is more easily peeled off and the surface quality of the model is better.

Keywords: 3D printing; STL model; support structure; rapid prototyping; automatic generation algorithm

0 引言

随着全球工业的快速发展, 快速成型技术 (rapid prototyping, RP) 已经成为发展最快的技术之一。目前存在多种打印技术, 但是其本质的不同在于打印的材料和打印的方式。有一些利用融化的可塑性材料来打印, 比如: 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打印, 例如: 立体平板印刷 (stereolithography, SLA) 和分层实体制造 (laminated object manufacturing, LOM)。每一种技术都有各自的优缺点, 一般根据不同的需求、打印机成本、打印速度和材料等方面考虑, 选择合适的打印技术^[1]。

熔融挤压 (FDM) 型三维打印机一般以热塑性材料, 如 PLA (Polylactic Acid) 塑料、ABS (acrylonitrile - butadiene - styrene copolymer) 塑料、尼龙等为打印原料,

打印时先将材料融化, 然后通过喷头沿着一定路径将材料挤出到打印平台, 材料迅速冷却凝固, 然后在打印第二层, 直到模型打印完毕。由于 FDM 这种堆叠式的加工方式, 遇到模型中悬空部分是, 打印材料无法在半空中凝固成型, 因此需要用户为悬空部分模型添加支撑结构^[2-3]。支撑结构会随着模型一起被打印, 但是由于其不属于模型本身, 因此在完成打印后需要将支撑结构拆除。支撑结构拆除会对模型表面造成损伤, 因此在保证模型顺利成型的前提下应该尽可能的减少支撑结构与模型表面的接触面积和减少支撑结构本身的体积。

目前在支撑研究方面已经有人做了大量的工作, Wang^[4]等提出了一种蒙皮——框架轻量打印模型, 并在此基础上拓展出一种圆柱支撑结构的生成方法。陈岩等^[5]在 wang 的基础上提出一种改进方法, 这两种方法的支撑结构均为独立圆柱体, 虽然可以节省时间, 但是打印时稳定性不够。Cura 软件通过在待支撑面添加稀疏密度的网格结构作为支撑体, 这样虽然支撑结构稳定, 但是会浪费材料, 增加打印时间。Zhang^[6]等受自然骨架的启发, 设计在模型内部的六边形支撑结构, 该结构能够使模型承受外部各个

收稿日期: 2018-03-06; 修回日期: 2018-03-30。

作者简介: 宋廷强(1971-), 男, 博士, 副教授, 硕导, 主要从事嵌入式系统、计算机控制、计算机应用方向的研究。

方向的负荷,稳定性好,但是支撑结构在模型内部,无法去除。MeshMixer 公司提出一种树状支撑结构生成方法,但是该方法某些时候仍需要人工干预,有一定的学习成本,而且有时会出现打印失败的现象。宋国华^[7]等基于 L-系统原理设计一套仿树状支撑结构的生成方法,该树状支撑结构对称生长,稳定性好,但是支撑结构与模型接触点坐标计算复杂,且不易去除。

本文设计实现一种自动生成的柱状支撑结构,首先对 STL 文件建立拓扑结构,划分出独立的待支撑区域,然后通过边长自适应法获得平面中的采样点,进而通过射线与面相交法获得三维模型表面的待支撑点集。为了提高模型整体稳定性,本文的支撑结构尽量从 XOY 平面生成。最后对支撑结构进行调整,方便从模型表面剥离。

1 STL 文件拓扑结构建立

STL 文件由美国 3D System 公司提出的一种 CAD 系统与快速成型系统之间的数据交换格式,由于它格式简单,对三维模型建模方法没有特定的要求,因此得到广泛的应用,成为快速成型系统中事实上的标准文件输入格式^[8]。STL 文件只存放 CAD 模型表面的离散三角形面片信息,并且三角面片信息是无序存储的。

由于 STL 文件中三角面片信息都是无序存放的,且存在大量的冗余数据。由于缺乏各面片间的邻接关系,如果寻找某个三角面片的相邻面片时需要进行大量计算,非常不利于后续待支撑面片的合并。因此需要建立 STL 文件的拓扑序列,本文设计的拓扑结构如图 1 所示。

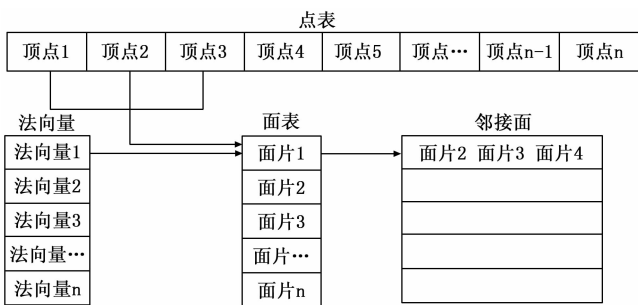


图 1 STL 文件拓扑结构示意图

首先需要建立一个存储无重复顶点的点表,由于在 STL 文件中相邻三角形面片共用两个顶点,因此 STL 文件中存储大量的冗余顶点坐标。建立点表的目的是为了消除冗余信息,每个顶点坐标只存储一次,减少计算量。传统方法通过先判断两个顶点坐标是否完全一致,不一致则存储到点表的方法效率太低,会浪费大量时间。由于用哈希表存储顶点的坐标检索运算平均可能达到常数的时间,又能通过哈希函数的运算快速找到冗余的顶点坐标^[9],因此本文把顶点的坐标作为关键字,通过哈希函数快速计算出顶点对应的哈希地址。哈希地址冲突时说明两顶点坐标相同,不需要存储到点表中。

然后建立存储所有三角面片点信息的面表,面表中不直接存储点坐标信息,而是存储该点坐标在点表中的索引位置。同时建立与面表对应的法向量表。正确的 STL 数据模型必须满足如下一致性规则:1) 相邻两个三角形之间只有一条公共边,即相邻三角形必须共享两个顶点;2) 每一条组成三角形的边有且只有两个三角形面片与之相连。因此可以通过两个面片存储的点坐标索引值是否有两个相同而判断两个三角面片是否相邻,可以得到面片的邻接面片索引值。这样当有需要时可以通过面表可以直接找到对应顶点的索引,也可以快速找到相邻的面表索引,计算机处理速度更快,可以更快捷的得到需要的信息。

2 待支撑面片提取与快速合并

2.1 临界角定义

在 FDM 技术中由于材料自身的粘性作用,在一定的倾角范围内,成型表面不需要添加支撑。计算所有三角面片的法向量 n 与 Z 轴正方向之间的夹角 γ 如图 2 所示,本文测得打印机的临界角度为 α ,如果 $\gamma > \alpha$,则该三角面片为待支撑面片。由于不同打印机,不同打印材料,以及不同的打印参数的影响,临界角并不是一个固定的值。本文以 SmartMaker 打印机使用 PLA 材料进行实验。通过实验结果比较,临界角 $\alpha = 40^\circ$ 比较合适。

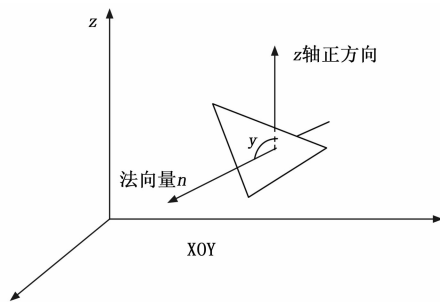


图 2 临界角示意图

2.2 待支撑面片快速合并

通过计算临界角,得到的待支撑三角面片都是互相独立的,为了合理添加支撑结构和减少后期计算量,需要将独立的三角形面片按相邻关系连接起来,得到独立的待支撑区域。面片合并采用的方法为种子扩散法^[10]如图 3 所示。取待支撑面片集合中的第一个待支撑面片 a 作为种子面片,存入种子表,然后使用上一小节 STL 文件拓扑结构建立算法得到的面片邻接表,从中快速找到 a 面片的 3 个相邻面片 b 、 c 、 d ,分别判断这 3 个相邻面片是否在待支撑面片集合中,如果存在,则将该相邻面片存入种子表,并将 a 面片从待支撑面片集合中删除,如果 3 个相邻面片都不在待支撑面片集合中,则代表 a 面片是一个孤立的待支撑面片。然后继续寻找种子表中的其他种子的相邻三角面片,直到种子表中所有种子都查找过为止,一个独立的待支撑区域查找完成,重复上述方法,直到待支撑面片集合为空时,

所有待支撑区域全部查找完毕。

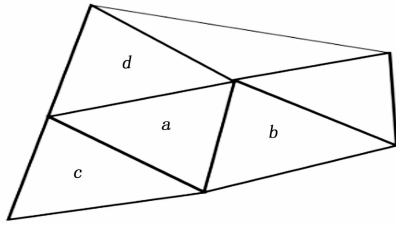


图 3 种子扩散法示意图

3 支撑点采样

通过上节的计算可以得到若干个独立的待支撑区域, 若对每个待支撑区域的所有待支撑面都添加支撑, 则会导致支撑过难以去除的问题。因此对悬空区域进行采样, 获得少量待支撑点是非常必要的。但是对于某一处悬空区域, 如果采样点过少, 则不能保证模型正常成型。若是采样点过多, 虽然可以很好的保证模型成型, 但是支撑难以去除而且浪费大量材料。因此采样点的数目应该在一个合理的范围之内, 既能保证模型正常成型, 又能节约材料。由于在三维空间中进行重采样需要进行大量的计算, 会严重降低算法的效率, 因此本文采样算法在悬空区域的投影区进行, 然后通过计算得到对应的悬空面上的点。

3.1 边长自适应采样法

栅格采样是最常用的方法, 将待支撑区域的三角面片坐标像平面进行投影, 取得投影区域的 X, Y 轴的最大最小值, 继而获得待支撑投影区域的最小矩形包围盒。平面投影区域内通过给定采样间距 d 将投影区域栅格化, 然后在每个栅格内选取对应的点。但是该方法由于间距 d 为给定的固定值, 矩形包围盒的长宽可能不是 d 的整数倍, 因此采样时会存在误差。并且当投影矩形一条边小于间距 d , 而另一条边大于间距 d 时, 短边会被忽略, 影响待支撑点的选取。

边长自适应采样是在栅格采样的基础上改进而来, 栅格采样基于固定的采样间距, 而边长自适应采样的间距根据边长不同是动态变化的。对于一个投影区域, 需要找到最合理的采样点数 N , 既可以使模型正常成型, 又能尽可能的减少支撑数量。假设材料在没有支撑下保持不变形的最长打印长度为 d_{max} , 因此为了避免误差, 我们认为在投影矩形的 X, Y 边上的最大采样数目为:

$$\begin{cases} N_x = \frac{(X_{max} - X_{min})}{N_x} + 1 \\ N_y = \frac{(Y_{max} - Y_{min})}{N_y} + 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整, 因此 X, Y 边的采样距离分为:

$$\begin{cases} d_x = \frac{(X_{max} - X_{min})}{N_x} \\ d_y = \frac{(Y_{max} - Y_{min})}{N_y} \end{cases} \quad (2)$$

此时可以在投影矩形中得到 N_x, N_y 个采样点 (x_i, y_i) :

$$\begin{cases} x_i = X_{min} + i * d_x \\ y_i = Y_{min} + i * d_y \end{cases} \quad (3)$$

对于一条边小于 d_{max} , 而另一条边远大于 d_{max} 的狭长投影矩形的情况, 我们认为不应该直接将短边忽略掉。因为如果切片时沿长边方向切片时, 打印头沿长边运动, 那这样会因为支撑点不足影响模型成型。因此对于这种情况我们规定长边采样距离正常取值, 短边采样距离应为短边长度的一半。

3.2 局部最低点采样法

上一节边长自适应采样法得到一组位于栅格交点上的采样点, 这种采样点分布的优点是排列整齐, 支撑结构之间距离相同。但是在实际打印过程中, 在某一区域内切片软件一般从该区域的最低点开始切片, 支撑结构在该区域的最低点下方生成相对比较合理。而上一小节的算法得到的采样点中可能会丢失局部最低点, 局部最低点采样法在边长自适应采样法的基础上改进而来。首先根据边长自适应采样法获得投影矩形各边的采样距离, 得到采样栅格, 然后将投影下来的各三角面片的顶点按着栅格边距进行划分, 选择一个栅格中高度最低的三角面片作为采样点。当栅格内最低点采样完成后, 需要对网格最低点进行筛选优化, 因为可能出现两个最低点距离非常近的情况。这时需要删除掉一个点, 选择栅格中心点作为新的采样点。该算法的具体流程如下。

Step1: 将最大采样距离设为 $d_{max} \setminus 2$, 根据边长自适应采样法得到各边的采样距离, 创建存储采样点的数组 supportP;

Step2: 根据各边采样距离, 划分网格;

Step3: 将待支撑三角面片的顶点坐标按着栅格边距划分到各个栅格中;

Step4: 从坐标 (x_{min}, y_{min}) 的栅格开始遍历, 寻找每个栅格中高度最低的面片顶点作为采样点, 加入到数组 supportP 中。继续寻找其他栅格中的最低点, 如果某个栅格中的最低点与 supportP 数组中的某一点距离非常近, 小于 d_{min} , 则放弃该点, 选择该网格的中心点作为采样点加入 supportP 数组; 否则将栅格中最低点加入 supportP 数组中。

采用上述方法得到的采样点可以保证选到该待支撑区域内的最低点, 虽然该方法的采样点不如边长自适应采样法得到采样点分布的均匀, 但是该方法有效的提升了支撑结构生成位置的合理性。

3.3 检测点与三角形位置

在矩形区域内取得采样点坐标后, 需要判断采样点是否位于悬空区域投影的内部。由于计算平面中某个点与不规则图形的位置比较麻烦, 本文提出一种简化算法, 将其转化为判断采样点与三角形的位置关系。通过上文已经获得所有待支撑三角面片坐标值, 以一个待支撑三角面片为

例,如图 4 所示,其坐标值 (A, B, C), 并且待支撑面片垂直向 XOY 平面进行投影, 因此计算可得三角面片在 XOY 投影坐标 (A', B', C')。采样点是否在投影区域的判断, 就可简化为判断每个采样点是否在相应的三角面片的投影三角形内 (A', B', C') 即可。

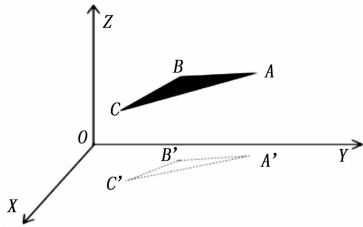


图 4 三角面片投影示意图

本文采用重心法^[11]判断点是否在三角形内部。如图 5 所示, 三角形 3 个点 ABC 在同一水平面上, 若选择 A 为起点, 则 B 点相当于在 AB 方向移动一段距离得到, 同样 C 点相当于在 AC 方向移动一段距离得到。因此, 对于该三角形内任意一点都可以有公式得到:

$$P = A + U * (C - A) + V * (B - A) \quad (4)$$

因此, 如果点 p 在三角形内部需要满足以下条件:

- (1) $U \geq 0$
- (2) $V \geq 0$
- (3) $U + V \leq 1$

通过计算得到 U, V 后, 比较是否满足以上条件, 若满足则点在三角形内部, 若不满足, 则点不在该三角形内部。

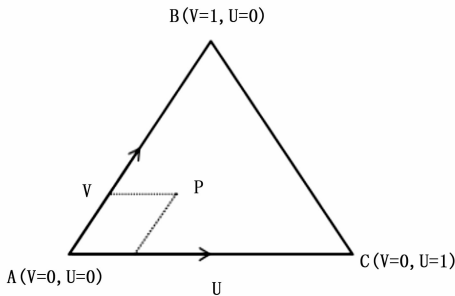


图 5 三角形向量表示图

3.4 射线与三角面片交点

通过上节算法证明采样点 p 在投影三角形内部, 但是由于支撑需要添加到模型表面, 因此需要计算出采样点在模型表面的坐标值。由图可知, 三角形 A' B' C' 内的采样点一定会在空间三角形 ABC 内部, 而且 X, Y 坐标不变, 只是 Z 轴坐标发生变化。因此, 求采样点在三维模型表面坐标简化为求过采样点 p 沿 Z 轴正方向的射线与三角形 ABC 的交点坐标, 射线与三角形的交点公式如下。

$$O + Dt = (1 - u - v)V_0 + uV_1 + vV_2 \quad (5)$$

通过化简求出 t, u, v 然后带入公式即可求出射线与三角形的交点, 该点即为待支撑点。

4 支撑结构生成

通过对每个投影区域的计算, 可以得到待支撑点集 P, 支撑结构的生成就是建立在待支撑点集 P 的基础上。陈岩等^[5]实现的柱状支撑结构将部分支撑生长在模型表面, 这样虽然具有减少支撑结构、缩短打印时间的优点, 但是由于模型表面本身不平坦, 并且与支撑结构接触面较小等原因会导致支撑结构不稳定。打印模型是一个连续的过程, 某一部分支撑的不稳定会极大增加模型打印失败的概率。若是模型打印失败, 那么前期为了节省材料和时间而做的工作就是无意义的, 因此为了提高模型打印成功率, 本文算法增加少量的支撑结构和打印时间从而提高模型稳定性。所以本文算法尽可能避免支撑结构在模型表面生成。对于每一个待支撑点 $p \in P$, 寻找一个支撑基点 q, 生成一个以 p, q 为顶点的柱状支撑结构。基点的选取, 本文算法首选在 XOY 平面上处于 p 点正下方的 q 点作为支撑基点。但是这样选择的 pq 支撑体, 可能会与模型相交, 还是会出现支撑结构生长在模型表面的问题。基于这个问题本文提出一个算法, 保证支撑体不与模型相交的前提下, 在 XOY 平面重新选择一个支撑基点 q', 使支撑体 pq' 既不与模型相交, 而且 pq' 长度是在所有选择中最短的。

4.1 支撑结构与模型相交检测

假设 pq 支撑结构与模型相交, q 是在 XOY 平面上处于 p 正下方的一个支撑基点。为了避免支撑结构与模型相交, 需要在 XOY 平面重新选择一个支撑基点 q', 由上文可知模型不需要支撑能够成型的临界角 $\alpha = 40^\circ$ 。因此对于重新选择的支撑基点 q', pq' 的倾斜角度也必须小于 α , 考虑到 pq' 为支撑结构, 还需要为模型提供有效支撑, 本文将 pq' 的最大倾斜角度定义为 $\beta = 30^\circ$ 。所以 q' 点的选择范围是以 p 为顶点, 以 γ 为半顶角, 高度为 p 点 z 轴高度的圆锥的底面圆内部。如图 6 所示。

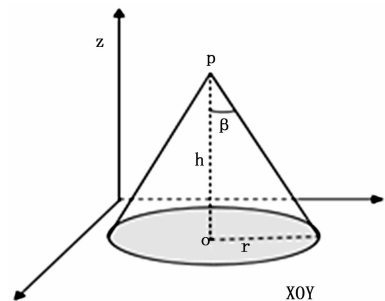


图 6 支撑结构有效生成区域

通过上图可知, 可选择的支撑基点 q' 包含在以 q 为圆心, 以 r 为半径的圆内。设 p 点的坐标为 (x_0, y_0, z_0) , pq' 的距离公式为:

$$l = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (0 - z_0)^2} \quad (6)$$

本文要寻找既不与模型相交, 同时支撑结构长度 pq' 要尽可能小, 即:

$$\min l = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (0-z_0)^2}$$

为了取值方便, x 、 y 需要满足的范围分别为:

$$x_0 - r \leq x \leq x_0 + r$$

$$y_0 - r \leq y \leq y_0 + r$$

$$d(x, y) = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \leq r$$

$$f(x, y) = 0$$

其中: $d(x, y)$ 函数表示重新选择的支撑基点 q' 的坐标位置, 当该点圆心距离小于等于圆的半径 r 时, 说明该点坐标位于圆内, 符合要求, $f(x, y)$ 函数表示由 q' 点发出的沿 pq' 方向的射线是否与模型存在交点, 如果存在交点函数值为 1, 不存在交点函数值为 0。

所以针对该算法的数学模型如式 (7) 所示:

$$\min l = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (0-z_0)^2}$$

$$s. t. \begin{cases} x_0 - r \leq x \leq x_0 + r \\ y_0 - r \leq y \leq y_0 + r \\ d(x, y) \leq r \\ f(x, y) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

最后针对该数学模型求出相应的解, 即是新的基点 q' 的坐标。

4.2 支撑结构优化

由于支撑结构并不属于模型中的一部分, 是为了保证模型能够成功打印人为添加的部分。因此在模型打印完成后, 支撑结构需要去除。为了提高模型表面质量, 同时保证支撑部分比较容易去除, 最有效的方法就是减少支撑与模型的接触面积。因此本文对与模型直接接触的支撑结构顶部做削尖处理。其次, 支撑结构本身的稳定性与其长度成反比。陈岩^[5]等总结出一个支撑结构宽度与长度的关系公式。

$$w = 1 + l/30 \quad (8)$$

其中: w 为支撑结构宽度 (单位: mm), l 为支撑结构长度 (单位: mm)。

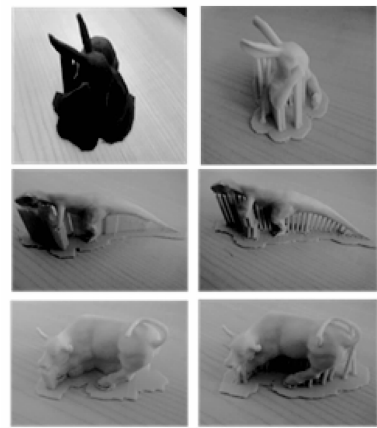
最后增大支撑结构与平台的接触面积, 形成一个底座, 因为接触面积越大越稳定, 不容易发生翘边等现象。

5 实验结果

本文对不同模型通过本算法生成支撑结构, 并与平常使用的 Cura 软件生成的支撑结构进行对比。所有模型均是在 SmartMaker 打印机上采用 PLA 塑料打印, 打印机参数设置完全一样情况下进行打印。我们将本文算法生成的支撑结构与 Cura 软件自带的支撑算法进行对比, 图 7 展示了本文算法生成的支撑结构与 Cura 软件生成的支撑结构实际打印结果。

图中 (a) 列为 Cura 软件生成的支撑情况, (b) 列为本文算法生成的支撑情况。本文主要材料消耗、稳定性、易剥离性 3 个方面比较两个算法的效果。

通过上表实验结果可以看出本文算法在消耗材料方面相比 Cura 软件平均减少 15%, 而在稳定性方面, 两者都很



(a) (b)

图 7 模型打印效果图

表 1 本文算法与 Cura 算法对比表

模型	Cura 软件			本文算法		
	消耗材料	稳定性	易剥离性	消耗材料	稳定性	易剥离性
兔子	16 g	高	差	14 g	高	好
恐龙	12 g	高	差	9 g	高	好
水牛	13 g	高	差	11 g	高	好

稳定, 可以有效的形成对模型的支撑。在易剥离性方面, 由于本文算法对支撑结构进行了削尖处理, 有效的减少了支撑结构与模型的接触面积, 并且支撑结构尽量避免在模型表面生成, 因此支撑结构只有削尖的一端与模型接触, 所以本文算法在较容易去除支撑的同时, 提高了模型表面的质量。Cura 软件生成的支撑结构与模型接触面积非常大, 很难去除, 并且对模型表面质量损害比较严重。综合对比, 本文算法相比 Cura 软件生成的支撑结构, 有用料少, 稳定性高, 易剥离, 对模型质量损害小的优点。

6 结束语

本文通过哈希函数建立了 STL 文件的拓扑结构, 通过三角面片法向量与打印正方向夹角与临界角大小比较获得待支撑三角面片, 提出基于边长自适应法和射线与三角面片相交法得到待支撑点集, 并改进支撑结构, 使支撑结构与模型接触面积减小、不与模型相交, 提高了模型表面质量。

本文算法生成的支撑结构虽然具有稳定性好、易去除、用料少等优点, 但是也存在一些待改进的地方, 比如当支撑结构比较多时, 会增加打印头空移时间, 会相应的增加打印时间, 下一步将针对以上问题进行改进优化。

参考文献:

[1] 李 峰. FDM 支撑原理及支撑工艺研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
 [2] 龚志海. 熔丝沉积成型工艺支撑自动生成技术研究 [D]. 武

汉：华中科技大学，2006.

[3] 王彦云, 陈 鸿, 谢明师, 等. FDM 快速成型支撑结构自动生成算法的研究 [J]. 计算机技术与应用, 2015, 41 (8): 146 - 148.

[4] Wang W, Wang T Y, Yang Z, et al. Cost - effective printing of 3D objects with skin - frame structures [J]. ACM Trans Graph, 2013, 32: 2504 - 2507.

[5] 陈 岩, 王士玮, 杨周旺, 等. FDM 三维打印的支撑结构的设计算法 [J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45 (2): 259 - 269.

[6] Zhang X, Xia Y, Wang J, et al. Media axis tree—an internal supporting structure for 3D Printing [J]. Computer Aided Geometric Design, 2015, 35/36: 148 - 162.

[7] 宋国华, 敬石开, 许文婷, 等. 面向熔融沉积成型的树状支撑结构生成设计方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22 (3): 583 - 588.

[8] 王彦云, 陈 鸿, 谢明师, 等. 基于哈希表的 STL 格式文件拓扑重建的算法 [J]. 现代制造工程, 2015, 12: 62 - 64.

[9] 王增波. STL 格式文件的快速拓扑重建算法 [J]. 计算机应用, 2014, 34 (9): 2720 - 2724.

[10] 魏 群. 基于 STL 模型的 RP 支撑自动生成系统研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2003.

[11] Tomas Moller, Ben Trumbore. Fast, Minimum Storage Ray - Triangle Intersection [J]. Journal of Graphics Tools, 1997, 2 (1): 21 - 28.

(上接第 276 页)

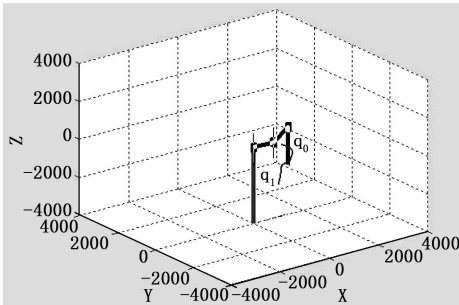


图 7 Scara 机械手 Matlab 模型及路径规划仿真

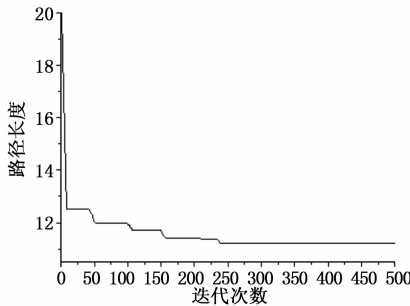


图 8 本文遗传算法迭代次数与路径规划长度的变化关系

前取得较大进展的人工势场算法只适用于局部路径最优解, 本文没有与其进行比较。

表 1 本文遗传算法与其它三维路径规划算法的性能比较

	最短路径长度	搜索时间/ms	最优路径比例/%
本文遗传算法	11.2	328	95
传统遗传算法	15.7	672	65
A * 算法	20.9	341	48

4 结束语

本文在分析和建立了机械手的三维操作空间模型的基础上, 提出了基于三维操作空间路径规划的改进遗传算法, 保证了机械手臂在避开障碍物的基础上, 从起始点到目标点运动路径最短, 并与传统路径规划算法进行了性能比较,

在最优路径比例及搜索时间等性能上占据这相对优势。弥补了人工势场局部最优解, A * 算法避障路径规划不合理, 传统遗传算法搜索效率低, 机械臂与障碍物发生干涉等问题。同时本文提出的将实数编码与三维坐标编码相结合的编码方式提高了搜索效率, 简化了计算过程, 同时使得路径编码更加直观。

参考文献:

[1] Wu X J, Tang J, Li Q, et al. Development of a configuration space motion planner for robot in dynamic environment [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2007, 25 (1).

[2] Carsten J, Ferguson D, Stentz A. 3D field D * : Improved path planning and replanning in three dimensions [A]. IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006; 3381 - 3386.

[3] Khatib O. Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5 (1): 90 - 98.

[4] 贾庆轩, 陈 钢, 孙汉旭, 等. 基于 A * 算法的空间机械臂避障路径规划 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (13): 109 - 115.

[5] 伊华伟. 基于改进蚁群算法的机械手三维操作路径规划 [J]. 计算机应用与软件, 2014, 31 (4): 302 - 304.

[6] 彭礼辉. 机械臂运动学与路径规划研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2012.

[7] 徐美清, 孙晨亮. 基于栅格地图的遗传算法路径规划 [J]. 科技信息, 2011 (31): 76 - 77.

[8] 田 欣, 刘广瑞, 周文博, 郭珂甫. 基于改进自适应遗传算法的机器人路径规划研究 [J]. 机床与液压, 2016, 44 (17): 24 - 28.

[9] 张 毅, 代恩灿, 罗 元. 基于改进遗传算法的移动机器人路径规划 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (1): 313 - 316.

[10] 杜宗宗. 基于遗传算法的移动机器人路径规划研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2009.