

文章编号: 0258-7025(2008)10-1623-04

基于 STL 数据模型动态拓扑重构的快速切片算法

马良 黄卫东

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 分析了现有金属激光立体成形(MLSF)切片算法,提出了一种基于 STL 模型动态拓扑重构的快速切片算法。根据 STL 模型中三角面片的几何信息和切片厚度,通过建立分组矩阵,减小了三角面片遍历的次数;通过构建三角面片之间的局部动态拓扑关系,减小了切片平面与三角面片的求交计算次数;并根据切片过程中大部分三角面片的毗邻关系不发生改变这一事实,提出了动态拓扑重构的算法,减小了切片过程中三角面片毗邻关系的查找次数,从而提高了切片算法的整体效率。在该算法的基础上,使用 Visual C++ 和 OpenGL 开发了金属激光立体成形软件系统。

关键词 激光技术;金属激光立体成形;三角面片;切片;动态拓扑重构

中图分类号 TP 391;TN 249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083510.1623

Rapid Slicing Algorithm Based on Dynamic Topological Reconstruction for STL Model

Ma Liang Huang Weidong

(States Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract The existing slicing algorithms for metal laser solid forming (MLSF) were analyzed. A rapid slicing algorithm based on dynamic topological reconstruction for STL (stereo lithography) model was proposed. According to geometrical information of the triangular facets and the slicing thickness, the times of traversing the triangular facets are reduced by using grouping matrix method. The times of intersecting between the slicing plane and the triangular facets are reduced by using the local dynamic topological construction algorithm. The fact that the topology of triangles between two slicing layers is similar or the same, a dynamic topological reconstruction algorithm is built. The time of searching adjoining relation among triangles is reduced, the efficiency of the slicing algorithm was increased effectively. On the basis of the algorithm, the software with independent intellectual property rights was developed using Visual C++ and OpenGL.

Key words laser technique; metal laser solid forming; triangular facet; slicing; dynamic topological reconstruction

1 引言

金属激光立体成形(MLSF)技术是综合激光技术,材料技术,计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)技术,数控技术等为一体的先进制造技术,通过逐层熔化、堆积材料成形金属零件,能够直接从 CAD 数据生成三维(3D)实体零件,广泛应用于制造业、医学、军工等领域^[1,2]。

切片算法是金属激光立体成形软件系统的关键

算法之一,目前对于三维 CAD 模型的切片主要分为两大类:基于 STL 文件的切片和基于某一 CAD 系统的直接切片。由于 STL 文件具有简单、通用以及与 CAD 平台无关等特点,使其成为金属激光立体成形与 CAD 系统之间的标准接口,目前几乎所有的商业 CAD 系统都支持该接口。

本文分析了现有切片算法,提出了动态拓扑重构算法,减少了毗邻三角面片拓扑关系的判断,提高

收稿日期:2007-11-20;收到修改稿日期:2008-02-14

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50331010)资助课题。

作者简介:马良(1978—),男,安徽人,博士后,主要从事激光快速成形制造方面的研究。

E-mail: ma_liang1978@sohu.com

导师简介:黄卫东(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事液态与半固态成形(凝固原理、激光加工、半固态成形)等方面的研究。E-mail: huang@nwpu.edu.cn

了切片算法的效率。在此基础上,开发了金属激光立体成形的软件系统,实验证明该算法稳定、可靠。

2 基于 STL 文件的切片算法

分析各三角面片与当前切片平面的位置关系,若相交,则求出交线;求出当前切片层的所有交线后,将各交线连接在一起形成轮廓环,当前层的所有轮廓环构成当前层的截面轮廓。

如果采用上述方法,切片过程将非常耗时,用户将无法接受。分析其过程可以发现,在进行某一层切片过程中,可能绝大多数三角面片与当前切片层都不相交,查找效率低下;另外,与切片平面相交的三角面片的每条边都要进行两次求交计算;其次,求出的交点还要连接,也是相当费时的过程;并且没有利用三角面片之间的拓扑关系。

因此,提出了各种改善措施:1) 基于 STL 模型几何特征的切片算法,即将三角面片分类、分级排列后进行切片处理,从而减小切割平面与三角面片的判断次数^[3,4];2) 基于全局几何拓扑重构的切片算法,即首先建立三角面片的拓扑结构,然后进行切片处理^[5~7];3) 基于分组矩阵的切片算法,即根据切片位置首先生成分组矩阵,依次建立活性三角面片队列,然后进行切片^[8]。

通过分析已有的这些切片算法,可以发现,算法1)减小了三角面片与切片平面的位置关系的判断次数,但需要对三角面片进行排序,对与当前切片平面相交的边要进行两次求交运算,得到两个交点,并且必须对交线进行连接处理,才能生成轮廓环。

算法2)通过重构三角面片之间的拓扑关系,从而利用建立的拓扑关系可以依次得到封闭的切片轮廓,并且避免了算法1)中进行两次求交的问题,算法2)对于三角面片较少的 STL 模型较为适用,当三角面片数目超过数万个时,建立完整的 STL 数据拓扑信息的过程将相当费时。

算法3)提出了基于分组矩阵和活性三角面片的思想,较好地结合了算法1),2)的优点,但是该算法没有利用局部毗邻层拓扑结构之间信息继承的特性。

3 动态拓扑重构的算法思想

设第 i 层三角面片构成的局部拓扑关系为 P_i ($i = 0, 1, \dots, n$),对于 STL 模型,大多数切片层中, P_i 与 P_{i-1} 基本相同,甚至拓扑结构完全一样。如图1所

示,第 i 层切片位置三角面片局部拓扑关系为: T1-T3-T5-T6-T7- T8-T9,而第 $i+1$ 层切片位置的三角面片局部拓扑关系为: T1-T3-T4-T8-T9,通过比较上下两层三角面片的拓扑关系可见,第 $i+1$ 层的三角面片 T4 取代了第 i 层的三角面片 T5-T6-T7,从而构建了新的局部拓扑关系。

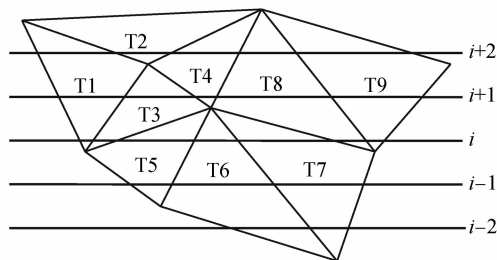


图1 STL 三角面片的局部拓扑关系
Fig. 1 Local topological relationship of the STL triangular facets

3.1 建立分组矩阵

STL 模型的三角面片在切片过程中的顺序可以根据该三角面片的最小值 Z_{\min} 来确定。 Z_{\min} 越小,则越先被切到,如三角面片 T5 较 T3 先被切到。最小值 Z_{\min} 在同一切片层内的三角面片将在同一分组中,如三角面片 T1, T3, T8, T9 将在同一分组中。所以,根据三角面片在切片过程中出现的先后顺序,首先对三角面片进行快速分组排序,每一个分组中包含的三角面片,对应于沿分层方向上与切片平面新相交的三角面片集合,所有分组组合在一起构成分组矩阵,如图2所示, G_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 表示与第 i 个切片平面新相交的三角面片集合,则 $G_i = (T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{im_i})$ 。只要对三角面片遍历一次,就可以建立该分组矩阵。

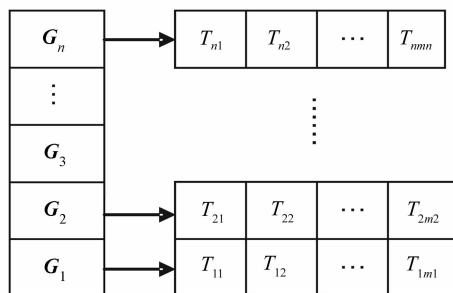


图2 STL 模型分组矩阵

Fig. 2 Group matrix of the STL model

3.2 动态拓扑信息重构

动态拓扑信息重构是指建立被当前切片位置所切割到的所有三角面片的拓扑毗邻关系。根据 STL 模型的分组矩阵和当前切片位置,可以得到被

当前切片位置所切割的所有三角面片号码, 据此建立各三角面片之间的拓扑毗邻信息, 这种局部建立拓扑关系的方法, 既可以简化切片求交算法, 避免算法 1) 的问题, 同时也利用了算法 2) 的优点。

在动态拓扑重构的过程中, 除了第一层需要从头构建局部拓扑关系外, 其余各层只要对局部进行拓扑更新即可。例如, 当切片位置从 Z_i 增加到 Z_{i+1} ($Z_{i+1} = Z_i + dZ$, dZ 为切片厚度) 时, 若某个三角面片的 Z_{\max} 小于 Z_{i+1} , 则应当从当前拓扑毗邻关系中删除, 并从新加入的三角面片中 (即分组矩阵的第 $i+1$ 行) 搜索替代毗邻关系, 重新构建新的毗邻拓扑关系。如果分组矩阵为空, 则表示没有新的三角面片加入, 则拓扑关系没有发生变化, 无需进行拓扑重构, 直接计算交点即可, 从而提高了切片算法的效率。

4 动态拓扑重构的算法实现

4.1 第一层三角面片拓扑关系的建立

分组矩阵 $G_1 = \{T_{11}, T_{12}, \dots, T_{1m_1}\}$ 给定了第一层切片所需的三角面片号码, 根据 G_1 构建三角面片的毗邻关系, 就得到了第一层三角面片的拓扑关系。

首先在 G_1 中任意选择一个三角面片, 生成一个 CContour 环类对象 (该类用来保存一组毗邻的三角面片号码)。

自定义 CContour 类为:

```
Class CContour::public Object {
    CArray<int,int> m_NumTri;
    //当前环的毗邻三角面片号码
    ...}
```

将三角面片号码添加到该环类对象中, 然后, 依次遍历剩余的三角面片, 搜索毗邻三角面片, 并检测环类对象的首尾三角面片是否毗邻, 如果检测到环的首尾三角面片毗邻, 则说明该环封闭, 已经找到了一条轮廓环。然后, 重新生成一个环对象, 并在剩余的三角面片中继续搜索查找封闭轮廓环, 直到所有的三角面片都已经添加到相应的轮廓环对象中, 第一层三角面片的拓扑关系才随之确定。

假设第一层的三角面片为 m 个, 因为每个三角面片都要在剩余的三角面片中搜索毗邻的三角面片, 所以最坏的情况下, 第一层算法需要执行 $\sum_{i=1}^m i$ 次毗邻判断。由于 CContour 环类保存的是 STL 三角面片的号码, 只需要一个 int 型的数组来保存拓扑关系, 所以第一层的拓扑信息所需要的占用计算

机内存空间为 $m \times \text{sizeof}(\text{int})$ 位。

4.2 三角面片拓扑关系更新算法

在该算法实现过程中, 维护一个局部动态拓扑结构是关键。由于每一切片层可能包含多个环, 即需要维护多条拓扑链条, 故建立了自定义 CContour 类, 用来保存三角面片之间的毗邻拓扑关系, 并定义了动态数组 $CArray<CContour^*, CContour^*> m_Contours$ 来管理所有的拓扑环信息。

在某一层 (例如第 $i+1$ 层) 拓扑信息重构过程中, 首先遍历当前每条环包含的所有三角面片, 如果某条环的某一个三角面片的 $Z_{\max} < Z_{i+1}$, 则将该三角面片从该环中删除, 并在分组矩阵 G_{i+1} 中搜索, 找到可以替代当前位置的三角面片。依次遍历当前拓扑信息中的所有三角面片, 完成拓扑环信息的更新。

该算法在对三角面片的拓扑信息更新过程中, 同时完成对三角面片拓扑信息更新和三角面片的求交运算, 从而通过一次遍历, 即可同时完成三角面片的拓扑重构和求交, 当拓扑重构结束时, 切片轮廓环的数据就完全产生了。具体流程如图 3 所示。

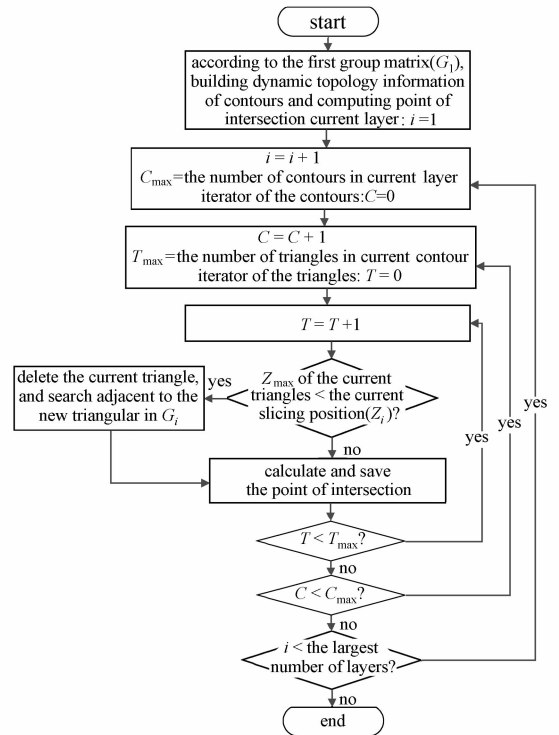


图 3 动态拓扑重构算法

Fig. 3 Dynamic topological reconstruction algorithm

通过更新算法可以快速完成对 STL 模型的拓扑重构和切片工作。从时间复杂性上分析: 最好情况, 即第 $i+1$ 层没有新的三角面片加入, 所以不需要对三角面片进行拓扑重构, 所需的时间只是根据拓扑关系计算当前层的轮廓环; 最坏情况, 即所有三

角面片都需要更新,所需的时间复杂性和空间复杂性与第一层拓扑重构相同。在大多数情况下,最坏情况不会出现。

对于生成的轮廓环信息,通过去除共线点等冗余信息后^[9],就可以保存到切片 CLI 文件中,从而进行路径规划设计和数控 G 代码生成等后续工作。

5 软件系统和应用实例

以上述算法为核心,应用 Visual C++ 6.0 和开放式图形接口 OpenGL,在 Windows XP 平台上开发了具有自主知识产权的分层处理软件,该软件运行界面如图 4 所示。软件使用单文档多窗口框架,各个窗口之间协同工作,可同步刷新,操作简便,运行稳定。

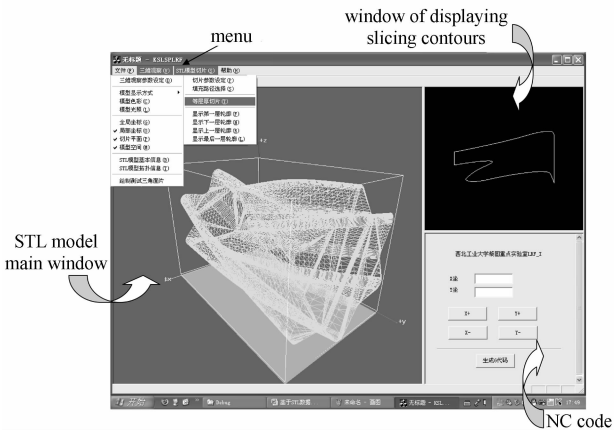


图 4 金属激光立体成形软件系统

Fig. 4 Software system of MLSF

在 Pentium III 1 GHz,内存 128 M,Windows XP 系统下,应用上述软件对如图 4 所示的六角形 STL 模型进行了切片测试,模型长宽高分别为 51.531605 mm × 80 mm × 55.198012 mm,共有三角面片 11268 个,切片厚度设定为 0.1 mm,切片层数为 551 层,所需时间 188 s。在相同的环境下,对全局拓扑重构(算法 2))进行了测试,仅全局拓扑重构大概就需要 8 min 的时间,因此基于局部拓扑重构的快速切片算法高效、稳定。

6 结 论

基于 STL 数据模型动态拓扑重构的快速切片算法充分利用了现有各种切片算法的优点,通过建立分组矩阵,减小了切片平面与三角面片相交判断的次数;通过构建三角面片之间的局部动态拓扑关

系,减小了切片平面与三角面片的求交计算次数,并避免了将切片线段组合成切片轮廓环的工作,提高了切片算法的效率;利用 STL 数据模型切片层之间拓扑信息继承的特性,加速了三角面片毗邻拓扑关系的建立速度,提高了切片算法的整体效率。在此基础上,开发了具有自主知识产权的金属激光立体成形软件系统。

参 考 文 献

- Han Yanfeng, Gao Bo, Hu Jiang *et al.*. Titanium coping fabricated with laser rapid forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6):876~880
韩彦峰,高勃,胡江等. 激光快速成形技术制作纯钛基底冠[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6):876~880
- Yu Jun, Chen Jing, Tan Hua *et al.*. Effect of process parameters in the laser rapid forming on deposition layer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7):1014~1018
于君,陈静,谭华等. 激光快速成形工艺参数对沉积层的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7):1014~1018
- Hu Dezhou, Li Zhanli, Li Dichen *et al.*. Algorithm for rapid slicing based on geometric feature classification of STL model [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2000, **34**(1):37~40
胡德州,李占利,李涤尘等. 基于 STL 模型几何特征分类的快速分层处理算法研究[J]. *西安交通大学学报*, 2000, **34**(1):37~40
- Li Zhanli, Liang Dong, Li Dichen *et al.*. Algorithm for rapid slicing based on the information inheriting [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2002, **36**(1):43~46
李占利,梁栋,李涤尘等. 基于信息继承的快速分层处理算法研究[J]. *西安交通大学学报*, 2002, **36**(1):43~46
- Xie Cunxi, Li Zhongyang, Cheng Xiaoyang. Construction of the adjoining relationship of STL files and the study on slicing algorithm [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2000, **28**(3):33~38
谢存禧,李仲阳,杨家红. 基于 STL 文件的快速成型分层算法与毗邻拓扑信息的快速提取[J]. *计算机工程与应用*, 2002, (7):32~35
- Li Zhongyang, Xie Cunxi, Yang Jiahong. Rapid acquisition of STL files' topology information and timely layer process [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2002, (7):32~35
李仲阳,谢存禧,杨家红. 基于 STL 文件的快速成型分层算法与毗邻拓扑信息的快速提取[J]. *计算机工程与应用*, 2002, (7):32~35
- Shi Zhenling, Zhou Shiquan, Yu Linbo *et al.*. Establishing of topology relationship about STL files and study on a new triangle-searching algorithm [J]. *New Technology & New Process*, 2006, (7):14~16
石振凌,周世权,余林波等. STL 文件拓扑关系的建立与新型三角片搜索算法研究[J]. *新技术新工艺*, 2006, (7):14~16
- Zhao Baojun, Wang Su, Chen Wuyi. Algorithm for rapid slicing STL model [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, **30**(4):329~333
赵保军,汪苏,陈五一. STL 数据模型的快速切片算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2004, **30**(4):329~333
- Zhao Jibin, Liu Weijun, Wang Yuechao. Optimize algorithm of slicing data for rapid prototyping [J]. *Mini-Micro Systems*, 2004, **25**(10):1818~1821
赵吉宾,刘伟军,王越超. 快速成型切片数据的优化算法研究[J]. *小型微型计算机系统*, 2004, **25**(10):1818~1821