

三角网格细分曲面数控加工刀轨快速生成算法^{*}

孙殿柱 范述鑫 李延瑞 田中朝

(山东理工大学机械工程学院, 255091 淄博)

【摘要】 提出了一种基于三角网格细分曲面模型的刀轨生成算法,建立三角网格细分曲面模型的空间聚类索引结构,基于该结构实现网格模型与刀轨截面快速、精确求交获取刀触点集,并根据刀触点对应曲面位置处的微分几何性质确定刀位点,采用最小生成树算法对刀位点集排序生成刀轨。实例证明,该算法可有效提高复杂曲面模型的刀轨生成效率及精度。

关键词: 刀轨生成 三角网格曲面 R^* -树 细分曲面

中图分类号: TP391.73 **文献标识码:** A

Algorithm of NC Tool Path Generation for Triangular Meshing Subdivision Surface

Sun Dianzhu Fan Shuxin Li Yanrui Tian Zhongchao

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255091, China)

Abstract

An algorithm of NC tool path generation for triangular meshing subdivision surface was proposed, which included three steps: first, the tool touching points were obtained through computing the intersection between the meshing model and the section based on the spatial index structure of triangular mesh subdivision surface; second, the cutter location points were generated according to the geometric properties on differential calculus of surface position corresponding to tool touching points; third, the cutter location points were ordered by using the minimum spanning tree algorithm, and which is proved that the algorithm can improve the efficiency of NC tool path generation and process precision effectively.

Key words NC tool path generation, Triangular mesh surface, R^* -tree, Subdivision surface

引言

三角网格曲面可实现基于产品外形采样数据点云的曲面模型快速精确重构,目前已在产品逆向工程领域获得广泛应用。对基于逆向工程系统输出的三角网格曲面模型直接进行数控加工,可有效缩短复杂外形产品开发周期,降低产品成本,但由于三角网格曲面仅能实现工件型面的离散逼近表示且模型数据量大,其数控加工刀轨求解精度与效率是制约逆向工程与现行CAM技术无缝集成的关键问题。

文献[1]采用三次 Bézier 插值曲线代替网格边

界计算刀位数据,一定程度上提高了刀轨精度,但由于曲线插值过程复杂,当刀轨截面过密时,导致网格边界重复插值,刀轨生成效率低。文献[2]采用细分曲面精确表示工件模型,基于等距偏置曲面计算刀位数据,但是为提高刀轨精度需要对工件模型多次细分及等距偏置运算,严重影响了刀轨生成效率。此外,三角网格曲面模型通常由大规模密集三角面片组成,为提高网格模型几何运算效率,建立合理的数据结构是首要条件。

本文引入 R^* -tree 动态空间索引结构并对其进行改进,基于该结构组织三角网格细分曲面所包

含面片集的空间聚类分簇, 根据刀轨截面与 R^* -tree 各层索引结点 MBR 的位置关系, 深度优先遍历 R^* -tree, 快速获取与刀轨截面相交数据结点中的三角面片, 以加快刀触点求解速度, 根据工件局部型面微分几何性质确定刀位点。

1 三角网格曲面空间索引结构

R^* -tree 对于多维数据具有良好的空间聚类特性, 通过引入 R^* -tree^[3] 索引结构并对其进行改进, 建立三角网格曲面的三维空间索引结构, 可有效解决三角网格模型数据结构的创建及动态维护。

1.1 索引结点规范化表示

R^* -tree 结点插入算法以结点 MBR (minimum bounding rectangle) 增量作为结点聚类分簇判定条件^[4], 该算法应用于三角面片集合的空间聚类分簇时, 若三角面片平行于坐标平面, 结点的 MBR 将会由三维退化为二维, 导致 R^* -tree 结点插入失效, 破坏了 R^* -tree 结点的聚合性。为解决该问题, 将三角面片及索引结点 MBR 统一表示为四维点对象 (x, y, z, r) , 如图 1 中所示 (x, y, z) 为 MBR 中心坐标, r 为 MBR 的外接球半径值。

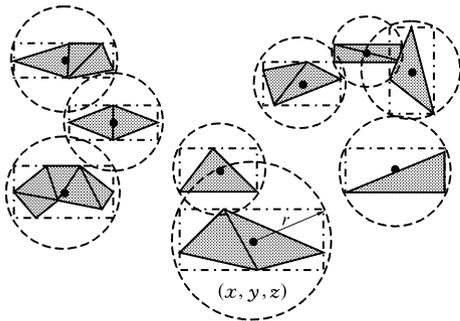


图 1 索引结点规范化表示

Fig.1 Normative express of index nodes

1.2 三角面片集合的 k-means 聚类分簇

采用 k-means 算法^[5] 实现三角面片集合的空间聚类分簇。在选取初始分簇中心时, 为减少 k-means 迭代次数, 将结点中心距离最远的一对结点 MBR 的中心作为初始分簇中心。

确定初始分簇中心后, 将数据对象添加到中心距其最近的分簇中。为使结点 MBR 均匀, 避免出现结点 MBR 奇异, 根据 R^* -tree 定义, 当分裂所得结点的子结点数 k 小于 R^* -tree 最小子结点数 m 时, 则将另一簇中距离当前簇较近的 $m - k$ 个结点插入到当前簇中, 并调整分裂结果。

采用 k-means 对 R^* -tree 索引结点进行聚类分簇时, 需要迭代定位最终的分簇中心。对于同簇结点中的 N 个索引结点, 其四维标准化坐标为 $p_i(x_i, y_i, z_i, \omega_i), i = 1, 2, \dots, N$, 分簇中心坐标为

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \omega_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i} \\ \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \omega_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i} \\ \bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^N z_i \omega_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i} \end{cases} \quad (1)$$

索引结点至聚类分簇中心的距离为

$$d = [(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2 + (r_i - \bar{r})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

基于四维点表示的三角网格曲面空间聚类分簇效果如图 2 所示。

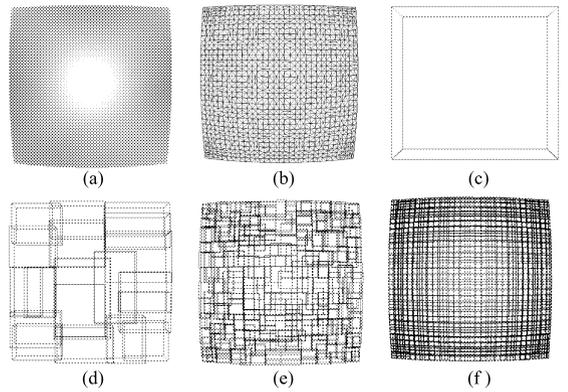


图 2 球面模型空间聚类分簇效果图

Fig.2 Result of establishing trees for sphere mesh model

(a) 球面模型渲染图 (b) 三角网格模型 (c) 第 1 层结点
(d) 第 2 层结点 (e) 叶结点 (f) 数据结点

2 三角网格细分曲面模型刀轨生成

采用 R^* -tree 组织三角网格细分曲面的空间拓扑结构, 利用深度优先遍历方式获取与刀轨截面相交数据结点内的三角面片, 根据刀轨截面与相交三角面片求交获取刀触点, 采用点法矢计算其刀位点。

2.1 相交三角面片的获取

R^* -tree 各层结点的 MBR 与刀轨截面有相离、相切和相交 3 种位置关系。刀轨截面与三角网格的相交包括相切和相交 2 种情况。对图 2 中球面模型与刀轨截面求交如图 3 所示。三角网格曲面索引结构第 1 层结点与刀轨截面相交子结点如图 3a 所示, 细框代表结点 MBR, 粗框代表与刀轨截面相交子结点 MBR; 遍历查找下层结点如图 3b 所示; 最终获取叶结点中与刀轨截面相交数据结点如图 3c

所示,所获取数据结点中的三角面片即为三角网格曲面与刀轨截面相交的三角面片。

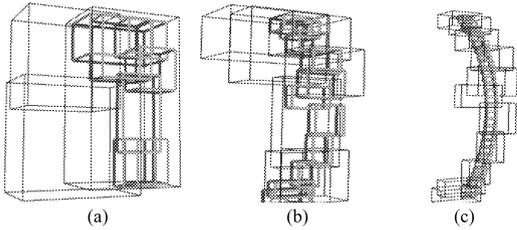


图3 相交数据结点获取过程示意图

Fig.3 Process of obtaining intersectant data nodes

2.2 刀位点的计算

相交数据结点中的三角面片与刀轨截面同样存在相离、相切和相交3种位置关系,依据三角面片各顶点位于刀轨截面的位置进行判断,只有当三角面片各顶点不同时位于刀轨截面同侧的情况下,刀轨截面才与三角面片相交。将与刀轨截面相交的三角面片与刀轨截面进行求交,获取其交点。

通过三角面片与刀轨截面求交获取的交点为刀触点,刀触点根据刀具的类型经过相应的转换生成刀位点。如图4所示,通过三角网格空间索引结构

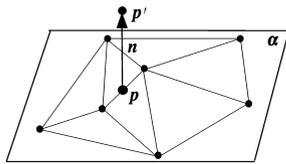


图4 点法求取刀位点示意图

获取刀触点 p 所在网格边界两顶点,并查找过该两个顶点所有三角面片的顶点构成刀触点 p 的近邻点簇,由刀触点 p 及其近邻点簇建立微切平面^[6],将该微切平面 α 的方向矢量 n 作为工件型面在刀触点 p 处的法向矢量。复杂曲面模型常采用球头铣刀进行加工,球头铣刀的刀位点是其球心,故刀位点 p' 可由刀触点 p 沿其法向 n 偏置刀具半径距离获取,依次存放到刀位点链表中。

2.3 刀位点的排序

刀位点链表中是一些杂乱无序的散乱数据点集,设集合 V 为链表中所有交点的集合,集合 U 存放 V 的最小生成树的顶点,集合 T 存放 V 最小生成树的边,各点之间的距离作为各条边的权值,采用 Prim 算法^[7]对其进行排序:①令集合 U 的初值为 $U = \{u_1\}$ (假设构造最小生成树时,从交点 u_1 出发),集合 T 初值为空。②从 $u \in U, v \in V - U$ 的边中,选取具有最小权值的边 (u, v) ,将顶点 v 加入到集合 U 中,将边 (u, v) 加入到集合 T 中。③重复②,直到 $U = V$ 时,最小生成树构造完毕,此时集合 T 中包含了最小生成树的所有边,最小生成树所有边的顶点依次输出就是排序后刀位点集。

每行有序的刀位点集经后置处理生成 NC 加工

代码,可实现网格曲面模型的数控加工。

3 应用实例

选用 4 mm 直径的球头铣刀,残留高度误差精度依次设为 0.05、0.02 和 0.01 mm,对文献[1]、[2]及本文算法进行实验分析。

对图 5a 所示的 Venus 头像曲面模型进行数据采样,基于采样数据重建三角网格曲面模型,三角面片数为 39 257,图 5b 为网格曲面局部效果,基于该模型采用文献[1]算法获取刀轨,刀轨生成时间及加工精度如表 1 所示。对重建的三角网格曲面模型进行 Loop 细分获取更高精度的三角网格曲面模型,三角面片数为 118 368,网格曲面局部效果如图 5c 所示,基于该模型生成刀轨,表 2 为文献[2]算法实验结果,表 3 为本文算法实验结果,刀轨效果如图 5d 所示。对比表 1 和表 3,虽然本文算法所采用的三角网格曲面模型面片数量约为文献[1]的 3 倍,但刀轨生成效率提高 30%~50%。对比表 2 与表 3,基于相同的网格曲面模型,本算法的刀轨生成速度比文献[2]提高约 60%。

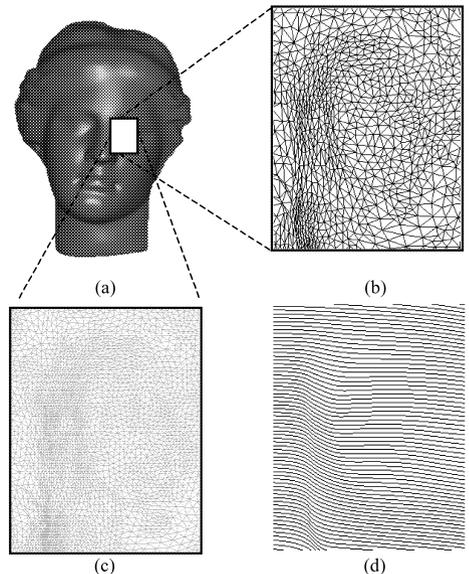


图5 Venus 头像模型

Fig.5 Venus head

表1 文献[1]算法实验结果

Tab.1 Experimental result of literature[1] algorithm

残留高度 /mm	刀轨生成 时间 t/s	加工精度 /mm	
		最大误差 E_{max}	平均误差 E_{av}
0.05	4.586 31	0.046 232	0.004 851
0.02	9.324 62	0.018 554	0.002 198
0.01	18.306 4	0.008 243	0.001 402

与未细分三角网格曲面相比,三角网格细分曲面可更精确表示原始模型,通过与原曲面模型加工

表2 文献[2]算法实验结果

Tab.2 Experimental result of literature[2] algorithm

残留高度/ mm	刀轨生成 时间 t/s	加工精度/mm	
		最大误差 E_{\max}	平均误差 E_{av}
0.05	5.939 82	0.045 452	0.004 625
0.02	15.232 2	0.017 625	0.001 945
0.01	30.488 4	0.008 057	0.001 164

表3 本文算法实验结果

Tab.3 Experimental result of this article algorithm

残留高度/ mm	刀轨生成 时间 t/s	加工精度/mm	
		最大误差 E_{\max}	平均误差 E_{av}
0.05	2.282 62	0.044 167	0.004 538
0.02	6.532 99	0.017 061	0.001 885
0.01	12.155 60	0.007 813	0.001 048

精度比较分析,本文算法刀轨精度比文献[1]提高5%~8%。本文根据刀触点处曲面微分几何性质进行局部偏置获取刀位点,与文献[2]采用的整体曲面等距偏置计算刀位点相比,求解刀位点更准确。

4 结论

(1) 基于改进的 R^* -tree 空间聚类索引结构实现刀轨截面与三角面片的快速求交,刀轨生成效率提高30%~60%。

(2) 三角网格细分曲面能够精确逼近工件模型,基于其生成刀轨,有效提高刀触点数据精度。

(3) 根据刀触点对应曲面位置处的微分几何性质确定刀位点,有效提高刀轨生成精度。

参 考 文 献

- 1 孙玉文,刘伟军,王越超. 基于三角网格曲面模型的刀位轨迹计算方法[J]. 机械工程学报,2002,38(10):50~54.
Sun Yuwen, Liu Weijun, Wang Yuechao. Research on the algorithm of NC tool path calculation for triangular surface machining[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(10): 50~54. (in Chinese)
- 2 钟大平,周来水,王占东,等. 细分曲面的 NC 刀轨生成算法及实现[J]. 东南大学学报:自然科学版,2004,34(1):50~53.
Zhong Daping, Zhou Laishui, Wang Zhandong, et al. Algorithm and implementation of generation of NC tool path for subdivision surface[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2004, 34(1): 50~53. (in Chinese)
- 3 Norbert Beckmann, Hans-Peter Begel, Ralf Schneider. The R^* -tree: an efficient and robust access method for points and rectangles+ [C]//Proceedings of the 1990 ACM SIGMOD International Conference on Management of Date, NY: ACM, 1990:322~331.
- 4 黄继先,鲍光淑,夏斌. 基于混合聚类算法的动态 R^* -树[J]. 中南大学学报:自然科学版,2006,37(2):366~370.
Huang Jixian, Bao Guangshu, Xia Bin. A dynamic R^* -tree index based on hybrid clustering algorithm[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(2): 366~370. (in Chinese)
- 5 Sotiris Brakastoulas, Dieter Pfoser, Yannis Theodoridis. Revisiting R-tree construction principles [C]// Proceedings 6th ADBIS, Bratislava, Slovakia, 2002: 149~162.
- 6 孙殿柱,范志先,李延瑞,等. 散乱数据点云型面特征分析算法的研究与应用[J]. 机械工程学报,2007,43(6):133~136.
Sun Dianzhu, Fan Zhixian, Li Yanrui, et al. Research and application of surface feature analysis for scatter data points[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(6): 133~136. (in Chinese)
- 7 杨文宇,刘健,余健明,等. 基于改进 prim 算法的配电网络优化规则方法[J]. 电工技术学报,2005,20(3):75~79.
Yang Wenyu, Liu Jian, Yu Jianming, et al. Distribution network optimal planning based on an improved prim algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(3): 75~79. (in Chinese)