

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2019.03.002

飞机蒙皮机器人化制造曲面分片算法研究

王乾杰 赵兴炜 陶波*

(华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘 要:

为实现飞机曲面机器人加工的自动轨迹规划,研究了基于模型几何特征的飞机曲面分片算法。通过分析飞机构件加工的工艺参数信息,以表面加工允许的最大曲率或最大偏角为阈值,提出基于近似曲率的三角网格模型分片方法。以三角网格中任意面片为起点,沿网格邻接关系向外拓展联接,形成若干近似平面化的模型分片结构,当超过阈值时则停止拓展,从而得到一整片曲面。通过对飞机 CAD 模型进行分片,发现采用本文提出方法可以保证分片结果的均匀性,为后期加工轨迹自动规划规划提供保障。

关键词: 曲面分片;表面加工;网格模型

中图分类号: V262.2⁺3

文献标识码: A

OSID:



0 引言

随着机器人自动化加工的逐渐普及,自动化打磨与自动化喷涂技术已广泛应用于汽车及家具加工等工业领域,且相较传统的手动加工,机器人自动化加工表现出了良好的加工精度和极高的加工效率。飞机加工领域对比汽车与家电加工行业有着更高的精度要求,为保障飞机飞行时的安全性,加工厚度与一致性必须满足设计需要,因此将机器人自动化加工引入飞机加工领域势在必行。

洛克希德·马丁公司针对 F-35 战机开发机器人飞机精整系统,实现对尾翼和小零件的自动喷涂,涂层厚度变化范围较手工喷涂提升 80%^[1];国内清华大学^[2]就飞机涂装自动喷涂技术进行解析和系统设计,喷涂误差在 10% 范围以内;中国民航大学^[3]针对飞机维护设计的涂层打磨系统,对飞机大机翼打磨的人力需求从 6 人降低至 2 人,极大地提升了加工效率。

一方面,大型飞机构件可以根据其实际功能分

解为多个功能结构,经人工分割后分别进行加工。另一方面,大型飞机构件属于大型复杂构件,需分解为多个功能结构,分别进行加工。传统加工方式采用手动分片,在规划加工轨迹的过程中便已完成各功能区域划分^[4],或是根据机械臂可达范围对模型进行分片处理^[2-3]。文献[5-7]在规划轨迹前对工件三角网格模型进行分片处理,对每一个分片区域分别进行轨迹规划,实现分操作的自动运行,拓展了机器人自动化加工的涵盖范围,但从实现角度来看依然存有一些问题:(1)分片结果不能保证任意两三角面片间法向矢量偏角或近似曲率小于设定阈值,而这正是保证加工质量的关键所在;(2)分片结果面积小数量多,极为琐碎,不利于加工效率的提升。随后文献[8]提出基于分水岭法的曲面分片方式,寻找并连接曲率发生突变的特征点形成曲面分片边界;文献[9-10]提出结合区域增长法的曲面分片方式,连接起点邻接具有相同曲面特征的面片形成加工分片。文献介绍方法可以一定程度上增大分片结果的面积,减少加工轨迹规划的次数,同时让

[基金项目] 国家重点研发计划(批准号:2017YFB1301504)资助项目。

* 通信作者: E-mail: taobo@hust.edu.cn

引用格式: 王乾杰,赵兴炜,陶波. 飞机蒙皮机器人化制造曲面分片算法研究[J]. 民用飞机设计与研究,2019(3):9-14.

WANG Q J, ZHAO X W, TAO B. Investigation on Surface Segmentation Algorithm for Robotic Manufacturing of Aircraft Skin[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2019(3):9-14(in Chinese).

每一个区域具有相同的曲率特征,但依然无法从数字上保证区域中的偏角和曲率小于阈值。文献[11]采用区域增长法,以三角面片法向矢量偏角为依据进行加工区域划分,保证分片区域的最大偏角小于偏角阈值。但文献针对复杂曲面喷涂加工,仅考虑偏角对加工质量的影响,不便于在打磨加工轨迹规划中使用,仍具有提升空间。

本文将根据表面加工的工艺模型对加工时的厚度及力学信息进行分析,提出以三角网格模型近似曲率为判据的曲面分片方法,提升分片区域加工性能。该方法可以生产相对比较平滑的曲面,有利于后期机器人加工轨迹的生成。并在 Visual Studio 2017 平台编写算法实现代码,验证大型飞机构件分片算法的效率和可靠性。

1 分片判据阈值的计算

大型飞机曲面加工,无论是涂层喷涂或是表面打磨,因其复杂的表面特征,都需进行曲面分片操作。引言中介绍了几种曲面加工分片方法,但都或多或少的存在不足,需对喷涂加工与打磨加工模型进行分析,获得贴合加工模型的分片判断依据。

通过分别分析曲面喷涂加工与曲面打磨加工的厚度模型与加工力学模型,分析曲面分片划分区域应满足的曲面特征,从而实现对大型飞机曲面分片阈值判据的推导与计算。

文献[12]根据赫兹接触理论,推导复杂曲面砂轮打磨的力学模型,得到截面线的压强分布函数:

$$P(x) = P_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2} \quad (1)$$

如图 1 所示,其中 P_0 为打磨区域最大压强, \bar{R} 为压力分布区域求解数据:

$$\frac{1}{\bar{R}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2)$$

$$\bar{R} = \sqrt{R \cdot d} \quad (3)$$

其中, R_1 、 R_2 分别为砂轮变形后中心点曲率半径和工件接触中心点曲率半径, d 为压痕深度。

为保证分片后划分范围内加工质量,加工区域的压强分布应尽量均匀,至少不能出现砂轮边界脱离工件表面的情况。若无脱离情况,则可认为 $R_1 = R_2$,则可设定参数 δ ($0 < \delta < 1$),令压强最小点 P ($L_c/2$) $\geq \delta P_0$,其中 L_c 为磨削接触宽度,可以求得加

工区域的最大曲率限制为:

$$\kappa \leq \frac{2d(1 - \delta^2)}{L_c^2} \quad (4)$$

本文使用飞机三角网格模型,数据格式为一系列三角形片体构成,保存三角面片的三个顶点坐标和法向矢量坐标。在计算近似曲率的过程中,计算两三角面片的法向矢量偏角 θ 及质心间距 l ,近似认为质心间距为一段曲率圆弧长,偏角为圆弧对应的圆心角。由此可计算得到曲率圆弧的半径:

$$R = \frac{l}{\theta} \quad (5)$$

由此计算得到近似曲率计算方法:

$$\kappa_{appro} = \frac{\theta}{l} \leq \frac{2d(1 - \delta^2)}{L_c^2} \quad (6)$$

在近似过程中将两三角面片质心间距视为曲率圆的一段圆弧,则作为对比的这两个三角面片必须足够接近,则在使用判据过程中,对比的三角面片应为相邻两三角面片。

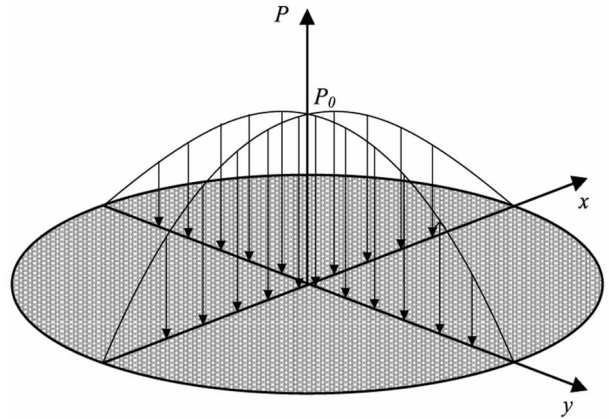


图 1 接触面压强分布

文献[13]分析喷涂加工的涂层厚度累积模型,令 Q_{\min} 、 Q_d 、 Q_{\max} 分别为最小、平均、最大漆膜厚度, Q_s 为任意位置 s 漆膜厚度, α_{th} 为该位置曲面法向矢量与与之相切平面法向矢量之间的偏角,则任意点 s 漆膜厚度应满足式(7):

$$Q_{\min} \cos \alpha_{th} \leq Q_s \leq Q_{\max} \quad (7)$$

若令 ΔQ_d 为涂层厚度最大允许偏差,则对喷涂区域整体喷涂厚度应满足:

$$Q_d - Q_{\min} \cos \alpha_{th} \leq \Delta Q_d \quad (8)$$

$$\alpha_{th} \leq \arccos\left(\frac{Q_d - \Delta Q_d}{Q_{\min}}\right) \quad (9)$$

在计算近似曲率阈值的过程中,将质心间距 l 默认为 1,使近似曲率数值阈值上与法向矢量偏角相等。

2 曲面分片及优化原理

2.1 基于区域增长法的曲面分片实现

本文对大型飞机模型进行曲面分片基于区域增长法,根据后续加工工艺的不同(曲面打磨或曲面喷涂)分别选取曲面分片判据,对模型进行处理。

获得飞机三角网格模型数据,将模型数据记录为一组三角面片集:

$$S = \{Tr_i \mid i = 1, 2, \dots, n\} \quad (10)$$

其中, Tr_i 表示三角网格模型中的第 i 个三角面片,模型中三角面片总数为 n 。每个三角面片 Tr_i 数据中包含面片的三个顶点坐标 $\{x_i, y_i, z_i\}$,以及面片的法向矢量 $norm_i$,若进行打磨操作的曲面分片,则加上面片的质心坐标 $mass_i$ 。获取后续加工工艺参数,根据式(6)和式(9)计算得到曲面分片判断阈值 κ_{appro} 或 α_{th} 。

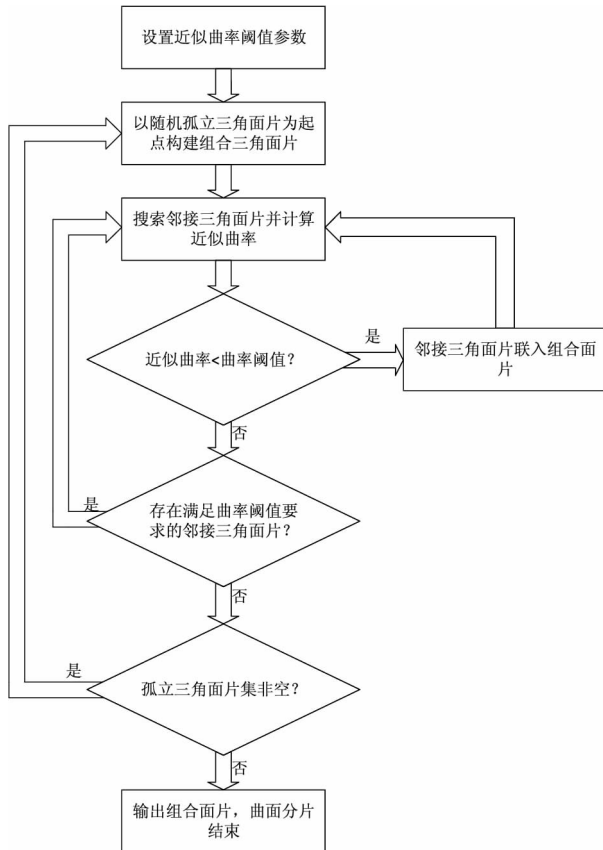


图2 曲面分片流程图

分片操作开始后,以三角网格模型中的随机三角面片 Tr_i 为起点,搜索与之相邻的三角面片 Tr_j ,计算两相邻三角面片法向矢量偏角 γ ,若偏角 γ 满足曲面分片判据,即 $\gamma/l < \kappa_{appro}$ 或是 $\gamma < \alpha_{th}$,则将三角面片 Tr_j 与三角面片 Tr_i 相连形成组合面片 S_{cb} ,并更新组合面片边界三角面片 Tr_{bnd} 。随后搜索与边界三角面片相邻的三角面片,并对相邻两个三角面片的偏角进行计算与分片判据进行对比,将满足者连接入组合面片。重复此类操作,直至组合面片 S_{cb} 中所有边界三角面片均不存在满足分片判断的相邻三角面片,则将组合面片 S_{cb} 视为一个三角面片几何并输出为三角网格模型,模型所描述便是一个曲面分片结果。随后再以任意零散三角面片为起点,重复上述操作,完成下一个分片区域的划分和储存,直至三角网格模型 S 中所有的三角面片均不存在满足分片判据的邻接三角面片,如图 2 所示。

2.2 对分片区域近似平面化

在简单根据第 1 节介绍的判据对模型进行分片操作过程中,由于判据针对对象为三角网格模型中的邻接三角形,分片结果可能不能直接使用于机械臂自动化加工。在对飞机模型进行分片的过程中,飞机的机身可近似视为一个圆柱,在曲面分片过程中可能会被完整提取出来如图 3 所示,对比后续加工中机械臂的可达范围,机身曲面的面积过大且不具备近似平面性的特征,需在后续进行优化。

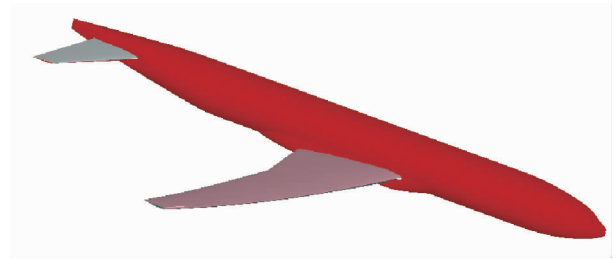


图3 未优化分片效果

为使分片结果可近似为平面,需对上文中的分片结果进行优化处理。将每个代表分片区域的组合面片 S_{cb} 定义为一个三角面片集:

$$S_{cb} = \{Tr_i \mid i = 1, 2, \dots, n\} \quad (11)$$

定义中各参数含义于式(10)中相同。从三角面片集 S_{cb} 中边界三角面片为起点,构件优化面片 S_{fin} ,具体操作如下:

1) 设定近似平面化区域最大偏角 θ_{\max} , 表示在分片结果优化过程中可以允许的优化结果区域中最大的法向矢量偏角。

2) 计算优化面片 S_{fin} 的面积平均法向矢量 $norm_{avg}$:

$$norm_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot norm_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (12)$$

其中, n 为优化面片中成员三角面片的数量, A_i 和 $norm_i$ 分别为第 i 个成员三角面片的面积和法向矢量。初始优化面片中仅有起点三角面片, 平均法矢即三角面片法矢。

3) 搜索与优化面片中边界三角面片邻接的三角面片, 并计算三角面片法向矢量与优化面片平均矢量的偏角 γ , 若 $\gamma < \theta_{\max}$, 将三角面片连接进入优化面片, 并更新优化面片的平均法向矢量。

4) 重复上述操作, 直至优化面片中边界三角面片不存在与之相邻且满足角度阈值限制的三角面片, 则优化面片构建完成, 保存优化面片集合, 完成一组曲面分片优化结构。

5) 重复上述操作, 直至组合面片中所有的三角面片均加入优化面片, 且所有优化面片构建完成, 则曲面区域近似平面化优化完成。

近似平面化处理后的模型表面将所有的法向矢量偏角限制在了最大偏角 θ_{\max} 以内, 符合近似平面化的思想, 更便于机器人自动化加工的实现。

2.3 小型区域与狭长区域的识别与剔除

随着分片的进行, 组合面片或优化面片可能出现包含三角面片数量极少便构造完成的情况。此类特征区域对应曲面模型中曲率较大的区域, 不满足保证加工质量的曲面几何限制, 在实际加工中不适用于机器人自动加工, 或者不适用于作为参数输入的表面加工工艺及工具。仅对曲面分片算法辅助的表面加工规划, 为保证加工表面厚度均匀性及维持自动化加工的高效性, 不宜对此类特征区域进行加工, 需进行识别与剔除。

完成近似平面化的加工区域优化后, 计算每个加工区域的面积 A_{fin} , 并计算飞机模型表面积 A , 设置曲面分片存贮面积最小占比 ε , 若加工区域面积与飞机模型面积的比值小于 ε , 即 $A_{fin} < \varepsilon \cdot A$, 则将该区域从分片结果中剔除, 在后续加工中有工人手工加工或更换加工参数对此区域进行规划。

3 算法验证

大型飞机曲面分片算法的验证采用式(9)描述的曲面喷涂加工的角度阈值判据对飞机模型进行曲面分割, 飞机模型下载自网络, 如图4所示。

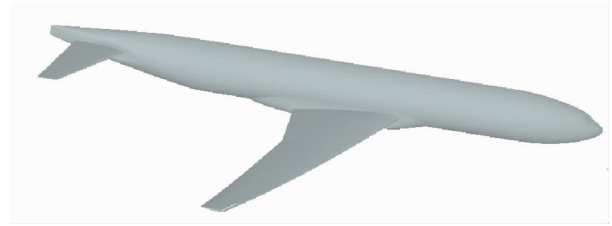
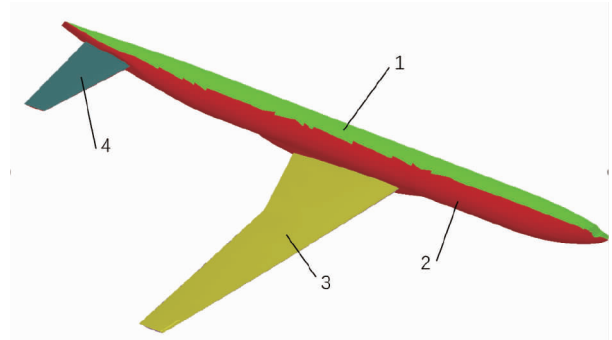


图4 飞机模型

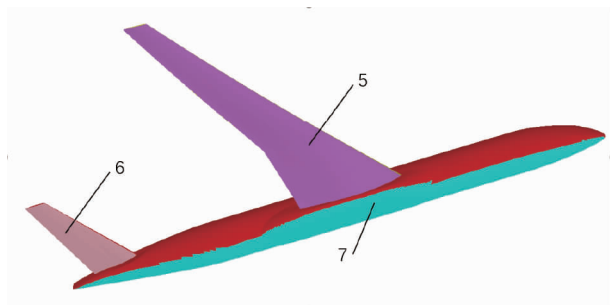
程序代码运行于 Windows 10 操作系统, Visual Studio 2017 平台下使用 C++ 语言编写, 结合 Open-CasCade 库实现算法显示模块实现。程序的开发和运行平台: CPU: Inter® Core™ i7-7700 @ 3.60GHz, 内存: 8GB, 显卡: 3GB。

导入原始模型 (*.igs), 使用商用软件 SOLIDWORKS 将模型转换为三角网格模型 (*.STL), 飞机三角网格中包含 18 016 个三角面片, 模型分片前设置法向矢量阈值 α_{th} 为 $0.35rad$, 近似平面化区域最大偏角 θ_{\max} 为 $1rad$, 存贮面积最小占比 ε 设置为 10%, 输入飞机三角网格模型, 运行曲面分片算法。

分片算法输出三角网格模型置于同一视图中, 分片效果图如图5所示, 从图中可以看出, 飞机曲面分片算法成功将飞机模型划分成为机翼上下表面(3、5)、尾翼上下表面(4、6), 以及被拆分为若干近似平面的飞机机身(1、2、7)共计 7 个区域。所有分片区域均具有近似平面的特性, 三角网格模型中显示的锯齿状边界在曲面拟合后可化为平滑边界。



(a) 俯视图



(b) 仰视图

图5 分片算法结果视图

算法验证过程中的模型数据与程序运行内存与时间消耗如表1所示,从表中可以看出,分块整体时间平均在5.82s左右,对比实际模型加工耗时,时间占比小,拥有很高的处理效率;曲面分片算法处理后的曲面模型表面特征均符合喷涂加工的参数需求,便于加工规划,保证了加工厚度的均匀性;算法简单,实现了大型飞机表面加工的全面自动化,提高模型生成效率,从而实现了加工轨迹规划流程整体效率。由此看来,本算法在加工中使用可带来显著的效果。

表1 算法验证参数

解决方案	时间消耗	内存消耗	文件格式	文件大小
Release	5.82s	2.60Mb	ASCII	4.86Mb

4 结论

分析曲面喷涂和曲面打磨的工艺模型,对曲面分片算法的阈值判据进行推导与计算,采用区域增长法对目标模型进行曲面分片,使分片区域拥有一致的表面特征,保证后续加工在分片区域内的均匀性;通过对分片结果进行优化处理,使分片曲面具有近似平面化的特征,符合轨迹规划习惯,且不会过于琐碎,便于对模型进行加工轨迹规划以提升规划效率。最后通过实际模型对算法进行验证,确保算法的可实现性。

参考文献:

- [1] 刘亚威. 机器人喷涂在 F-35 的应用[J]. 航空科学技术, 2011(5): 19-18.
- [2] 缪东晶, 吴聊, 徐静, 等. 飞机表面自动喷涂机器人系统与喷涂作业规划[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(2): 547-553.

- [3] 祝世兴, 蔡高存. 自适应飞机大翼打磨设备的设计与分析[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(6): 115-118.
- [4] 林焰, 衣正尧, 李玉平, 等. 大型船用坞内外板涂装机器人[J]. 机器人, 2018, 40(1): 115-128.
- [5] Wei Chen, Dean Zhao. Path planning for spray painting robot of workpiece surfaces [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013: 1-6.
- [6] Heping Chen, Ning Xi, Weihua Sheng. A general framework for automatic CAD-guided tool planning for surface manufacturing [C]. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei: IEEE; 2003.
- [7] Mayur V. Andulkar, Shital S. Chiddarwar. Incremental approach for trajectory generation of spray painting robot [J]. Industrial Robot: an International Journal, 2015, 42(3): 228-241.
- [8] 韩丽, 高小山, 楚秉智. 离散曲率约束的三角网格模型拓扑分割算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(6): 831-835.
- [9] 刘胜兰, 周儒荣, 安鲁陵. 三角网格模型的数据分块算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(6): 653-658.
- [10] Zezhong C. Chen, Zuomin Dong, Geoffrey W. Vickers. Automated surface subdivision and tool path generation for $3 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2}$ -axis CNC machining of sculptured parts [J]. Computers in Industry, 2003, 50: 319-331.
- [11] 冯浩, 龙迁瑶, 潘海鹏. 适用于喷涂的点云模型分块处理[J]. 机械设计与制造, 2016(3): 257-260.
- [12] 丁小天. 基于三维点云的大型复杂构件机器人自主加工轨迹规划[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019: 14-18.
- [13] 刘亚举. 面向曲率组合曲面的喷涂机器人喷枪轨迹优化研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016: 21-23.

作者简介

王乾杰 男, 硕士研究生。主要研究方向: 机器人自主加工分片规划。E-mail: 381235095@qq.com

赵兴炜 男, 博士, 讲师。主要研究方向: 机器人动力学与控制。E-mail: zhaoxingwei@hust.edu.cn

陶波 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 机器人学。E-mail: taobo@hust.edu.cn

Investigation on Surface Segmentation Algorithm for Robotic Manufacturing of Aircraft Skin

WANG Qianjie ZHAO Xingwei TAO Bo *

(State Key Lab of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to realize the automatic trajectory planning of robotic machining, surface segmentation algorithm for aircraft based on the geometric characteristics of the machining model was studied. Based on the analysis of the processing parameter, the segmentation algorithm for triangle mesh based on approximate curvature was proposed, and the maximum curvature or maximum deviation angle of the processing was used as the threshold. After that, adjacent triangle meshes were connected together, which started from an arbitrary patch in the mesh and end when the threshold was reached. As a result, a approximated planar segmentation surfaces was formed. The proposed algorithm was utilized for surface segmentation of a CAD model of aircraft. Its results showed the uniformity of the segmented surface, which could ensure the smoothness of the generated robotic machining trajectory.

Keywords: surface segmentation; surface processing; triangular mesh

* Corresponding author. E-mail: taobo@hust.edu.cn