

三角 Bézier 曲面粗加工刀轨生成算法

孙殿柱, 康新才, 李延瑞, 孙永伟
(山东理工大学机械工程学院, 255091, 山东淄博)

摘要: 为了解决三角 Bézier 曲面粗加工刀轨生成效率低以及存在的刀轨干涉等问题,提出了一种基于三角 Bézier 曲面粗加工刀轨生成算法. 该算法采用 R^*S 树建立三角 Bézier 曲面模型的动态索引,可快速获取瞬时加工区域三角 Bézier 曲面片,进而迭代计算无干涉刀位点. 建立了三角 Bézier 曲面的 z 向包络线,根据 z 向包络线与切削平面的关系,跟踪提取加工刀轨段,按照不同的走刀方式输出相应刀轨段来获取所需刀轨. 实例证明,该算法数据适应性强,算法运行效率高,可对复杂三角 Bézier 曲面模型生成无干涉粗加工数控刀轨.

关键词: 三角 Bézier 曲面; R^*S 树; z 向包络线; 粗加工刀轨

中图分类号: TP391.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)03-0070-05

Algorithm for Generating Rough Tool-Path Based on Triangular Bézier Surface

SUN Dianshu, KANG Xincan, LI Yanrui, SUN Yongwei

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

Abstract: An algorithm for generating rough tool-path based on triangular Bézier surface is proposed, which can be used to improve efficiency of the rough tool path generation for triangular Bézier surface and solve the interference issues of tool path. The R^*S tree is introduced into the algorithm and the dynamic spatial index structure of the triangular Bézier surface model is established by R^*S tree; the interferential-free cutter location points of triangular Bézier surface are acquired based on the R^*S tree and the z -direction enveloping line of the triangular Bézier surface is also established; the tool path segment is obtained by means of tracking and extracting according to the relationship between the cutting plane and z -direction enveloping line; the corresponding tool path segments are output according to different requirement, thus the required tool path is obtained. The strong adaptability of data type, the accuracy and efficiency for obtaining the interferential-free rough tool-path of the intricate triangular Bézier surface, are verified.

Keywords: triangular Bézier surface; R^*S tree; z -direction enveloping line; rough tool-path

在产品逆向工程中,三角 Bézier 曲面因其具有构型灵活、边界适应性好等优点,可有效地用于解决复杂点云数据的曲面快速、精确重建问题. 目前,三角 Bézier 曲面表示的产品数字化模型不能被主流 CAD/CAM 系统兼容,难以进行数控加工^[1],且很少有文献专门研究三角 Bézier 曲面数控加工方面

的问题,尤其在粗加工方面. 因此,研究三角 Bézier 曲面的粗加工刀轨生成算法具有重要的意义.

目前,三角 Bézier 曲面粗加工数控刀轨通常是基于精加工刀轨替代完成的,在加工过程中通过抬高对刀点来实现多趟走刀达到粗加工的目的. 文献[2]基于三角 Bézier 曲面模型,采用跟踪迭代求交

法^[3]来获取刀轨截平面与曲面的交线,继而偏置生成精加工刀轨.针对毛坯进行变切深或等切深均匀分层,在此基础上获取三角 Bézier 曲面的粗加工刀轨,使切削量均匀,编程自动化程度高,可避免多次对刀,从而使加工质量稳定,但该算法刀轨生成效率低,且无法避免干涉.

本文针对以上算法存在的不足,引入 R^*S 树建立三角 Bézier 曲面的动态索引,从而快速获取三角 Bézier 曲面无干涉刀位点.基于无干涉刀位点建立了三角 Bézier 曲面的 z 向包络线,根据 z 向包络线与切削平面的关系跟踪提取加工刀轨段,按照不同的走刀方式输出相应刀轨段来获取所需刀轨.实例证明,该算法数据适应性强,运行效率高,可对复杂三角 Bézier 曲面模型生成无干涉粗加工数控刀轨.

1 三角 Bézier 曲面动态索引的建立

动态索引 R^*S 树^[4]采用结点最小包围盒(MBR)组织数据对象的空间邻近关系,对于多维数据具有良好的空间聚类特性^[5].三角 Bézier 曲面通常由大量离散三角 Bézier 面片光滑拼接而成,采用 R^*S 树建立三角 Bézier 曲面的动态索引,可满足三角 Bézier 面片的快速定位与准确查询需求,从而提高了三角 Bézier 曲面粗加工刀轨的生成效率.

由于三角 Bézier 面片具有严格的边界性和凸包性^[6],因此面片会完全落在所控制的网格内.将三角 Bézier 面片对应的控制顶点作为数据结点,如图 1 所示,通过计算控制顶点 MBR,可方便建立三角 Bézier 曲面模型的动态索引.采用文献[4]中动态索引的构建方法,建立了如图 2 所示的三角 Bézier 曲面人脸模型动态索引,其效果如图 3 所示.

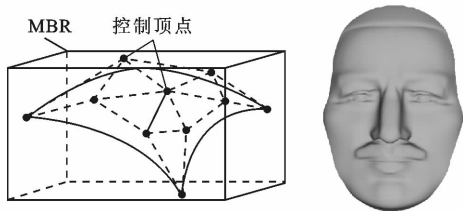


图1 控制顶点的 MBR 图2 人脸曲面模型

2 三角 Bézier 曲面 z 向包络线的建立

计算三角 Bézier 曲面在 xoy 面内投影的轴向包围矩形,根据实际毛坯尺寸将轴向包围矩形的各边向外偏置,偏置距离为刀具半径、加工余量及公差之和.以公差为间距将偏置后的矩形离散为网格点

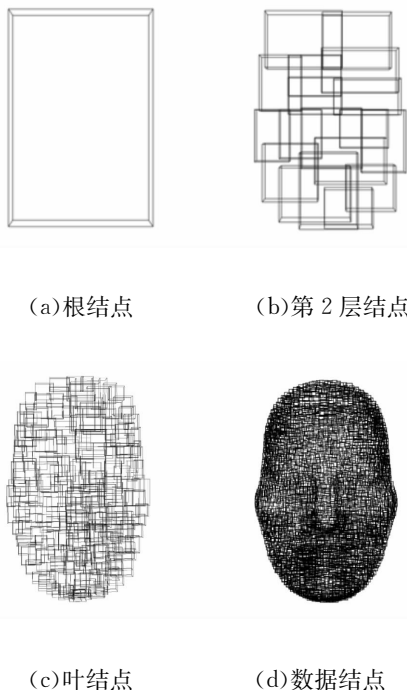


图3 人脸曲面模型动态索引各层结点的效果图

阵,将网格顶点作为刀位驱动点,采用投影法^[7]计算每个网格顶点对应的无干涉刀位点.最后,连接各行无干涉刀位点,以获取三角 Bézier 曲面的 z 向包络线.

2.1 刀具瞬时加工区域的获取

设当前网格顶点矢量为 Q 、刀具矢量为 v ,由 Q 、 v 可确定瞬时刀具轴线 A .三角 Bézier 曲面索引结点 MBR 的中心矢量及外接球半径分别为 C 、 r ,则索引结点与刀具轴线的距离为

$$d = |(C - Q)v| - r \quad (1)$$

为获取刀具瞬时加工区域内的数据,需逐层查找与刀具轴线距离小于刀具半径 r_a 的索引结点,以获取加工区域内的数据结点,如图 4a 和 4b 所示.

具体步骤如下.

- (1) 令结点 N 指向 R^*S 树根结点.
- (2) 若 N 的 MBR 到刀轴的距离不大于 r_a ,则执行步骤(3),否则执行步骤(4).
- (3) 若 N 为数据结点,则将其插入到切削区域结点序列中,否则将 N 中子结点插入到结点序列 L 中.
- (4) 若 L 不为空,从 L 中取出一个子结点令其为 N ,执行步骤(2),否则查询过程结束.

最后,将数据结点中存储的三角 Bézier 面片提取出来,即为瞬时加工区域面片,如图 4c 和图 4d 所示.

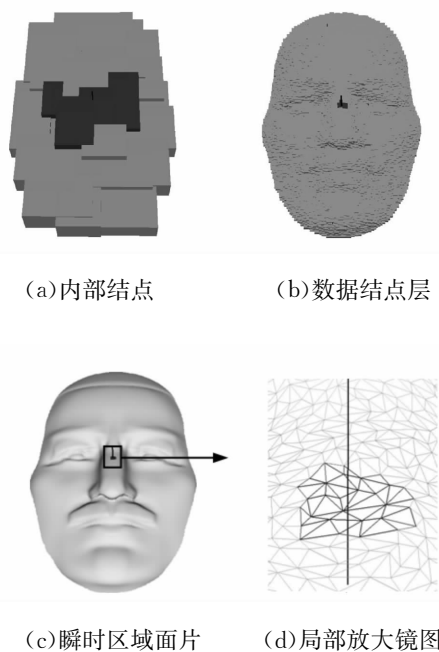


图4 刀具瞬时加工区域的获取过程

2.2 无干涉刀位点的迭代计算

依据刀具与瞬时加工区域中各三角 Bézier 面片的曲面相切或顶点相切,来获取各个三角 Bézier 面片对应的刀位点.对比当前加工区域中所有三角 Bézier 面片对应的刀位点,取刀轴方向上位置最高的刀位点作为当前网格顶点对应的无干涉刀位点,若瞬时加工区域为空,则刀位点不存在.

对瞬时加工区域中的三角 Bézier 面片迭代计算曲面相切刀位点,先计算刀具轴线与三角 Bézier 面片的交点 G (见图 5a),再过交点作曲面的切平面 F ,使球刀与切平面 F 相切于 P 点,迭代计算 P 的近曲面点^[8] P_1 (见图 5b).求 P 到 P_1 的距离 d ,如果 $d < \epsilon$ (ϵ 为设定的极小值),则认为 P_1 为球刀与面片的切点,进而计算刀位点 O ,使迭代计算结束.否则,以 P_1 代替 G 继续进行迭代计算.

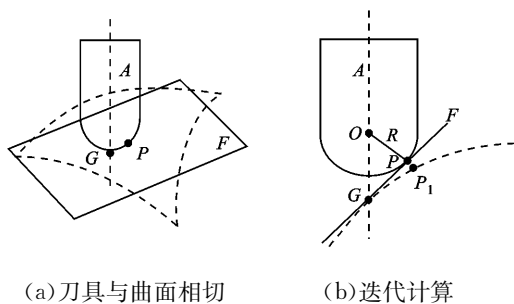


图5 曲面相切刀位点与迭代计算

在曲面相切刀位点迭代计算的过程中,若球刀与曲面片的切点超出域值范围或不在面片内部,即

参数不满足 $0 \leq (u, v, (u+v)) \leq 1$, 则曲面相切刀位点的迭代计算失效.采用顶点相切的方法来计算刀位点,球头刀与在刀具直径范围内的面片顶点进行计算,如图 6a 所示.与三角 Bézier 面片刀具直径范围内面片顶点对应的刀位点进行对比,取刀轴方向上位置最高的刀位点作为当前面片对应的无干涉刀位点,若刀具直径范围内无顶点相切,则刀位点不存在.

在曲面相切刀位点计算过程中,需计算刀具轴线与面片的交点,设 R_0 为三角 Bézier 面片上的初始点,如图 6b 所示,过点 R_0 做面片的切平面 F ,则 F 与轴线 A 相交于 G 点, G_0 为 G 点在面片上的近曲面点, F_1 为过点 G_0 的切平面.交点的迭代计算步骤如下.

(1) 计算过 R_0 的 F 与轴线 A 的交点.

(2) 获取 G 在三角 Bézier 面片上的 G_0 , 并计算 G 到 G_0 的距离 d_p .

(3) 当 $d_p < \epsilon$, 交点计算结束, 否则以 G_0 代替 R_0 执行步骤(1). 迭代过程一般在 3 次左右即可得到满足较高精度的交点.

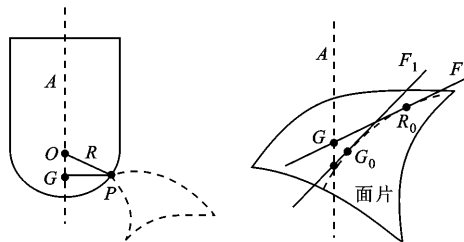


图6 直线与三角 Bézier 面片交点及顶点相切的计算

如果刀位点不存在,则根据毛坯形状确定刀位点,若为长方形毛坯则以模型底部高度作为该顶点的高度,并将其作为当前刀位点.若为与零件形状相似毛坯,则剔除当前驱动点.当瞬时加工区域所有面片对应刀位点计算完毕,对比当前加工区域中各三角 Bézier 面片对应的刀位点,取刀轴方向上位置最高的刀位点作为当前网格顶点所对应的无干涉刀位点.

2.3 z 向包络线的获取

设三角 Bézier 曲面在 xoy 面内投影的轴向包围矩形离散为 $m \times n$ 个网格顶点, $P_{i,j}$ 位于网格模型中第 i 行第 j 列, 其中 $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$, 每个网格顶点 $P_{i,j}$ 对应于一个刀位点 $D_{i,j}$, 依次连接各行刀位点, 从 $D_{i,0}$ 到 $D_{i,n}$ 形成模型的 z 向包络线, 如图 7 所示.

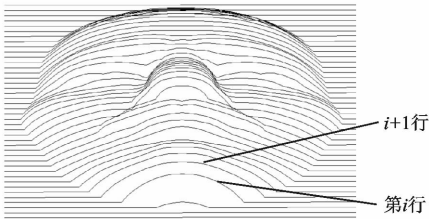


图 7 人脸曲面模型包络线

3 粗加工刀轨的生成

为获取粗加工刀轨,根据切削深度建立等距切削平面,依据 z 向包络线与切削平面的关系跟踪提取加工刀轨段,按照不同的走刀方式输出相应刀轨段来获取所需刀轨。

根据 z 向包络线与当前切削平面的关系跟踪提取加工刀轨段,令跟踪点 P_i 指向 z 向包络线的起点, P_n 为指向 P_i 的后一跟踪点,如图 8 所示. 当前求取的刀轨段的初始值 i 为 0,则 z 向包络线在当前平面内加工刀轨段的获取为:①检测 P_i 与当前切削平面的关系,若 P_i 位于平面的上方,执行④,否则执行②;②检测 i 是否等于 0,若 i 等于 0,将 P_i 向当前切削平面投影,并将投影点作为刀轨段的起点,执行③,否则直接执行③;③检测 P_n 与当前切削平面的关系,若 P_n 位于平面的上方,则对 P_iP_n 与平面进行求交,并将交点作为刀轨段的终点,完成刀轨段的提取,令 $i=i+1$,执行⑤,否则直接执行⑤;④检测 P_n 与当前切削平面的关系,若 P_n 位于平面的上方,执行⑤,否则对 P_iP_n 与平面进行求交,并将交点作为刀轨段的起点,执行⑤;⑤检测 P_n 的后 1 个跟踪点是否存在,若存在则令 $P_i=P_n$,执行①,否则执行⑥;⑥检测 P_n 与当前切削平面的关系,若 P_n 位于平面的上方,则当前包络线对应刀轨段提取完成,否则将 P_n 向当前切削平面投影,将投影点作为刀轨段的终点,则当前包络线对应的所有刀轨段的提取完成。



图 8 刀轨段的跟踪提取

当所有刀轨段提取完成后,根据不同走刀方式生成相应的刀轨,对于单向走刀方式,按照 z 向包络线的方向依次输出提取的各包络线上的刀轨段,并在相邻刀轨段间添加跨刀运动即可. 对于往复式走

刀方式,输出该层第一个刀轨段后,后续刀轨的输出以前一个刀轨段的尾部端点为目标,优先输出距离最近的刀轨段,同时检测二者之间连线所确定的刀位高度是否均低于切削平面高度,若低于切削平面,应直接以直线插补连接,否则添加跨刀标示,实现同层刀轨的输出. 同层刀轨输出完毕后,以本层刀轨段的结束点为目标点,比较下一层刀轨段端点与它之间的距离,优先输出距离最近的刀轨段,检测二者之间的连线高度是否均低于切削平面高度,决定是直接相连还是添加跨刀标识,将各层刀轨段最优输出,最终获取三角 Bézier 曲面的粗加工刀轨。

4 应用实例

采用文献[2]及本文算法,分别对图 2 所示的三角 Bézier 曲面人脸模型进行粗加工,生成数控刀轨,如图 9 所示. 选用 R10 球头铣刀,设置加工误差 $\delta=0.1\text{ mm}$,对比 2 种算法的刀轨生成精度. 文献[2]算法生成的刀轨在曲率大的地方形成干涉(见图 9b),本文算法生成的刀轨见图 9c、图 9d,这 2 种算法的刀轨误差如表 1 所示. 通过比较可知,本文算法的刀轨生成精度优于文献[2]算法,本文算法相对于文献[2]算法的刀轨精度提高了约 23.3%。

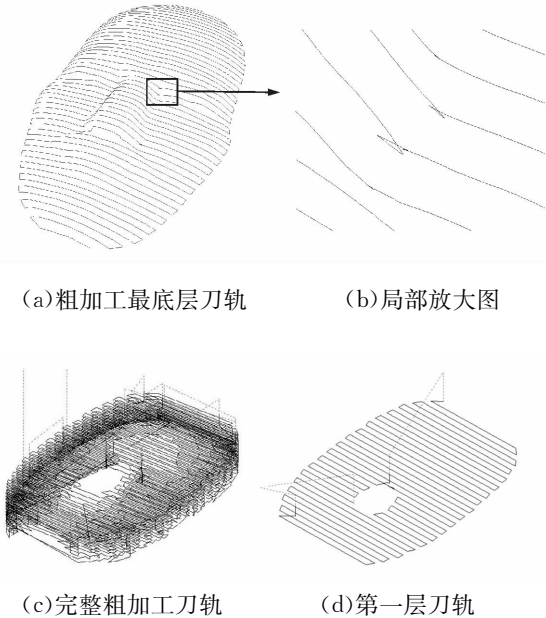


图 9 不同算法生成的刀轨

表 1 刀轨误差的比较 mm

算法	最大误差	平均误差	标准误差
文献[2]	0.369 1	0.120 3	0.024 3
本文	0.152 0	0.097 0	0.019 2

采用文献[2]和本文算法计算人脸模型不同刀轨误差时,刀轨的生成时间 t 见表 2. 通过比较可知,本文算法的刀轨生成效率优于文献[2]算法,刀轨生成效率提高了约 28.7%~35.2%.

表 2 不同加工误差时曲面模型的刀轨生成时间

δ/mm	t/s	
	文献[2]	本文
0.20	7.46	5.32
0.15	13.15	9.40
0.10	16.53	12.04
0.08	19.94	14.27
0.05	25.23	16.34

采用文献[2]及本文算法,对一组不同面片数量的三角 Bézier 曲面模型生成数控加工刀轨,记录刀轨的生成时间,验证刀轨生成效率,刀轨生成时间如图 10 所示. 通过比较可知,本文算法相对于文献[2]算法的刀轨生成效率平均提高了约 38.2%,且模型数据量越大刀轨的生成效率就越高.

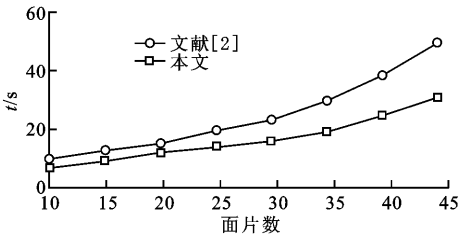


图 10 刀轨生成时间的对比

5 结 论

本文算法与文献[2]算法相比具有以下优点.

(1)引入 R^*S 树动态索引,显著提高了三角 Bézier 曲面数据查询、处理的效率,有效保证了刀轨的生成效率.

(2)通过迭代计算,准确获取三角 Bézier 曲面无干涉刀位点,从而有效地保证了刀轨的生成精度.

(3)基于无干涉刀位点,建立了 z 向包络线,根据包络线与切削平面的关系跟踪获取加工刀轨段,将各刀轨段按照不同的走刀方式输出,生成所需要的无干涉粗加工刀轨.

参考文献:

[1] 李志新,黄曼慧,成思源. 逆向工程中的 CAD 建模技术及软件系统 [J]. 机床与液压,2007,35(9):46-47.
LI Zhixin, HUANG Manhui, CHENG Siyuan. Study of CAD modeling and software for reverse engineering [J]. Machine Tool and Hydraulic, 2007, 35(9): 46-47.

[2] 肖尧先,柯映林,吕震. 基于三角 Bézier 曲面的粗加工数控编程 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2001,13(7):631-635.
XIAO Yaoxian, KE Yinglin, LÜ Zhen. Rough NC machining programming based on triangular Bézier [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2001,13(7):631-635.

[3] 李际军,柯映林,程耀东. 复合三角 Bézier 曲面和平面的求交及其应用 [J]. 汽车工程,2000,22(2):120-124.
LI Jijun, KE Yinglin, CHENG Yaodong. Intersection of composite triangular Bézier surface and plane and its application [J]. Automotive Engineering, 2000, 22(2):120-124.

[4] 孙殿柱,李心成,范志先,等. 采用 R^* -tree 的三角网格曲面非均匀精简算法 [J]. 西安交通大学学报,2008,42(9):1179-1183.
SUN Dianzhu, LI Xincheng, FAN Zhixian, et al. Simplified algorithm for triangular mesh surface based on R^* -tree [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(9):1179-1183.

[5] BECKMANN N, KRIEGEL H P, SCHNEIDER R, et al. The R^* -tree: an efficient and robust access method for points and rectangles [J]. ACM, 1990, 19(2): 322-331.

[6] FARIN G E. Curves and surfaces for computer aided geometric design [M]. New York, USA: Academic Press, 1996.

[7] 谢叻,周儒荣,阮雪榆. 自由曲面自适应投影法精加工刀轨生成 [J]. 上海交通大学学报,2000,4(10):1382-1384.
XIE Le, ZHOU Rurong, RUAN Xueyu. NC tool path generation based on adaptive projection method for freeform surfaces [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000,34(10):1382-1384.

[8] JOHN A. Convexity of Bézier nets on sub-triangles [J]. CAGD, 1991(8): 207-211.

(编辑 管咏梅)