

文章编号 1004-924X(2018)01-0132-10

叶片复杂曲面的机器人抛磨工艺规划

黄 婷, 许 辉, 樊 成, 孙立宁, 陈国栋*
(苏州大学 机器人与微系统研究中心, 江苏 苏州 215021)

摘要: 为了实现复杂曲面工件的智能抛磨加工, 对叶片复杂曲面进行机器人抛磨工艺规划。对抛磨点位置规划算法和基于最大接触原则的抛磨姿态规划算法进行了研究。首先, 通过平行截面法获得抛磨路径割线, 以非均匀有理 B 样条 (NURBS) 曲线描述。接着, 提取曲线特征参数, 根据设定的阈值进行抛磨点规划, 再基于抛磨轮与工件的最大接触原则进行抛磨点姿态规划, 从而得到完整的抛磨路径。然后, 将工件位姿从工件坐标系转换到 TCP 坐标系。最后, 搭建了柔性抛磨系统仿真平台生成机器人控制程序。实验结果表明, 此方法规划的路径可用于叶片复杂曲面的机器人抛磨加工。分别用本文规划所得路径和 CAM 软件规划所得路径对叶片进行抛磨加工, 测得表面粗糙度分别为 $0.695 \sim 0.930 \mu\text{m}$ 和 $2.803 \sim 3.243 \mu\text{m}$ 。本文提出的抛磨位姿规划方法可用于复杂曲面工件的抛磨路径规划, 使工具和工件保持最大接触, 从而避免了位姿不合理所产生的过抛和欠抛。

关键词: 非均匀有理 B 样条曲面; 机器人抛磨; 位置规划; 姿态规划

中图分类号: TP242.2; TP249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182601.0132

Robotic grinding process planning for complex blade surfaces

HUANG Ting, XU Hui, FAN Cheng, SUN Li-ning, CHEN Guo-dong*

(Robotics and Micro-systems Center, Soochow University, Suzhou 215021, China)

* Corresponding author, E-mail: chenguodong@suda.edu.cn

Abstract: In order to realize intelligent grinding and machining of workpieces with complex surfaces, robotic grinding process planning for complex blade surfaces was performed. The position planning algorithm of the grind point and the posture planning algorithm based on the maximum contact principle were studied. First, the grind path was obtained through the secant transverse line cutting method and described by NURBS curve, and then the curve feature parameters were extracted and grinding position planning was performed according to the set threshold. Then, based on the maximum contact principle of the grinding wheel and workpiece, the posture planning of the grind point was presented. After that, the complete grinding path was obtained. Then, the position and posture data were converted from workpiece coordinate system to TCP coordinate system. Finally, the simulation platform of flexible grinding system was constructed to generate robot control program. Experimental results indicate that the proposed path can be used for robotic grinding of blade complex surface. The blades are grinded by using the path obtained by proposed planning method and the path of CAM software planning, and the corresponding surface roughness is $0.695 \sim 0.930 \mu\text{m}$ and $2.803 \sim 3.243 \mu\text{m}$ respectively. Therefore, the proposed method can be applied to the

收稿日期: 2017-04-28; 修订日期: 2017-06-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51505312, No. U1509202)

grinding path planning of complex surface. It ensures that the tool and the workpiece are in maximum contact, and thereby avoids uneven grinding caused by the poor position and pose.

Key words: Non-uniform Rational B-Spline (NURBS) surface; robotic grinding; position planning; posture planning

1 引 言

叶片类复杂曲面零件在工业科技快速发展中的需求不断增长。当前叶片的抛磨加工方案主要有手工操作、数控机床加工及工业机器人抛磨。其中,人工抛磨效率低、一致性差,且劳动强度大、工作环境恶劣^[1-2],在以人为本和机器换人的大环境下,这种加工方式亟需被取代。数控机床则存在成本高、灵活性差等缺点^[3-4]。近年来,随着工业机器人技术的快速发展,机器人在抛磨加工中的应用日趋成熟。相较而言,机器人抛磨系统不仅灵活性好,通用性强、易于扩展,而且其成本也远低于数控机床^[5]。

目前抛磨路径生成的方法都是通过步长来控制离散直线的最大逼近误差,通过加工步距来保证最大残余高度误差,主要有:平行截面法^[6]、等参数线法、等弦高误差法、等残余高度法、等距偏置法、多面体法、特征提取法和 Z-map 法等^[7];文献[8]采用等弦高误差法和等残留高度法作为机器人磨削加工的步长和行距的计算方法;文献[9]以接触轮与叶片曲面的法向接触为出发点,提出了针对六轴叶片砂带抛磨系统中接触轮的位姿控制的三大原则;文献[10]根据最短工具路径时间给出了一种生成最优刀具路径的算法;文献[11]提出了一种应用于机器人砂带磨削的路径规划方法用于加工叶片;文献[12]提出了一种基于包围盒的机器人抛光路径生成方法。

以上文献对抛磨路径规划的研究主要集中在加工步长和加工步距两方面。通过加工步长控制离散直线段与实际曲线的弦高误差,加工步距保证两条相邻路径间的残留误差小于或等于加工精度。而对抛磨姿态对加工质量的影响并未进行深入研究。法曲率反映曲面的弯曲程度。对于法曲率变化较大的自由曲面零件,不合理的抛磨姿态容易导致工件的过抛或欠抛^[13]。为了避免加工超差,需要根据工件的弯曲程度来进行抛磨点姿态的规划。本文建立叶片非均匀有理 B 样条 (Non-Uniform Rational B-Spline, NURBS) 曲面

模型,对模型进行切割并提取曲线特征参数,确定阈值并计算出抛磨点,基于最大接触原则,确定以割线上抛磨点法向量与抛磨轮支撑方向重合,以两个主曲率方向分别为抛磨方向及抛磨轮轴线方向的抛磨姿态。实验证明该规划方法可用于实际机器人抛磨系统,并获得较好的抛磨效果。

2 抛磨路径规划

2.1 曲面模型描述

对机器人抛磨系统的控制的一个主要方面就是对机器人末端抛磨工具相对于工件的位姿的控制,不同的位姿规划方法不仅影响工件最终的加工质量,还影响加工效率。待抛磨工件型面是自由曲面,要求工件表面及抛磨加工路径连续且平滑。



(a) 叶片实物

(a) Blade entity



(b) 叶片模型

(b) Blade model

图 1 叶片工件

Fig. 1 Blade workpiece

叶片工件的实物及模型图如图 1 所示, NURBS 曲线曲面可以统一表达自由曲线曲面和解析曲线曲面,并且具有连续性、平滑性和局部可控性等特点,是计算机几何信息表达、设计和数据交换等方面的工业标准,在计算机辅助设计

(Computer Aided Design, CAD)/计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing, CAM)系统中得到广泛应用。因此,建立工件的 NURBS 曲面模型如下:

$$p(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \omega_{i,j} d_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \omega_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}, \quad (1)$$

式中: $\omega_{i,j}$ 为权因子, $d_{i,j}$ 为曲面控制点, $N_{i,p}(u)$ 、 $N_{j,q}(v)$ 分别为 p 次、 q 次 B 样条基函数。

2.2 曲面路径点提取

通过平行截面法对工件模型的空间曲面 $p(u, v)$ 进行截取,提取截平面与曲面的割线 C_i , 采用 k 次 NURBS 曲线描述,表达式为:

$$p(u) = \frac{\sum_{i=0}^n \omega_i d_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(u)}, \quad (2)$$

其中: $\omega_i (i=0, 1, \dots, n)$ 为权因子, 首末权因子 $\omega_0, \omega_n > 0$, 其余 $\omega_i \geq 0$, $d_i (i=0, 1, \dots, n)$ 为曲线的控制顶点, $N_{i,k}(u) (i=0, 1, \dots, n)$ 为 k 次 B 样条基函数。

求取加工点序列的基本思想是通过构造曲线基准线,根据加工精度确定误差阈值 ϵ ,根据算法对基准线进行细分,直到曲线上所有点到对应基准线的距离都小于或等于 ϵ ,得到抛磨点序列。算法示意图如图 2 所示。

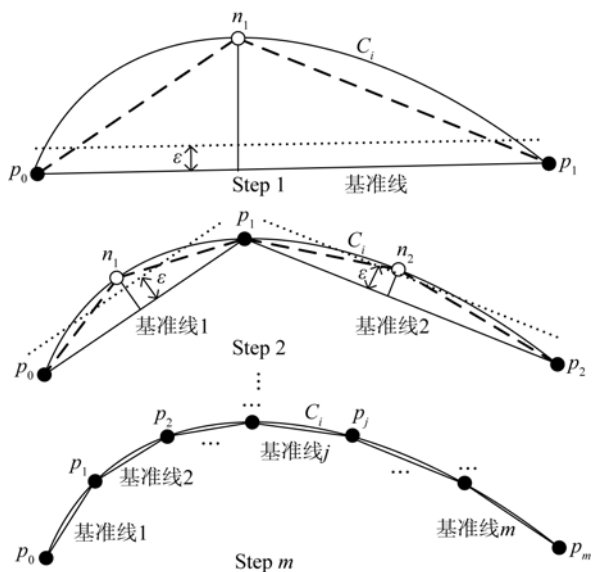


图 2 抛磨点提取算法示意图

Fig. 2 Sketch of algorithm for extracting polishing point

具体过程如下:

(1)解析 IGES 图形格式,提取曲线参数;

(2)确定距离阈值 ϵ ;

(3)对于割线 $C_i (1 \leq i \leq N, N$ 为曲面被截取的割线路径条数),连接第一个和最后一个边界点,生成抛磨点数据列表 $\{p_0, p_1\}$;

(4)连接 $p_0 p_1$ 作为基准线;

(5)计算曲线 C_i 上的点到基准线的距离,判断是否存在距离大于 ϵ 的点,如存在,则记录距离基准线最远的点 n_1 ,删除基准线;

(6)点 n_1 插入到 p_0 和 p_1 之间,原 p_1 赋值给 p_2, n_1 赋值给 p_1 。更新后的抛磨点数据列表为 $\{p_0, p_1, p_2\}$;

(7)连接 $p_0 p_1$ 作为基准线 1, $p_1 p_2$ 作为基准线 2;

(8)计算 C_i 上 $\{p_0, p_1\}$ 间的点到基准线 1 的距离,判断是否存在距离大于 ϵ 的点,如存在,则记录距离基准线最远的点 n_1 ,删除基准线 1;

(9)计算 C_i 上 $\{p_1, p_2\}$ 间的点到基准线 2 的距离,判断是否存在距离大于 ϵ 的点,如存在,则记录距离基准线最远的点 n_2 ,删除基准线 2;

(10)点 n_1 插入到 p_0 和 p_1 之间,点 n_2 插入到 p_1 和 p_2 之间,更新抛磨点数据列表为 $\{p_0, p_1, p_2, p_3, p_4\}$;

(11)对数据列表 $\{p_0, p_1, \dots, p_j\}$,依次连接得到基准线 1, 2, \dots, j ,分别求 C_i 在各区间中的所有点到各自基准线的距离,若存在大于 ϵ 的点,则记录距离该基准线最远的点,插入相应区间并更新数据列表,直到所有点到它们的基准线的距离都小于或等于 ϵ ,得到最终抛磨点数据列表 $\{p_0, p_1, \dots, p_m\}, m \leq n$ 。

根据以上算法可知,阈值设置越小,从曲线上提取的抛磨点越多,加工轨迹越接近实际曲线,但可能会影响加工效率。阈值设置过大,提取的抛磨点数过少,则可能导致加工路径与实际曲线差异过大,最终影响抛磨精度。因此,需要结合工艺上对表面精度的要求来确定所需抛磨点的密集程度,选择合适的阈值。当阈值确定,对于割线 C_i ,在其曲率较大的曲线段,由于其弯曲程度较大,为了使曲线上的点到基线的距离小于或等于 ϵ ,需要细分的次数相对较多,因此,曲率较大区域所提取的抛磨点相对较密集,曲率较小区域抛磨点较稀疏。

2.3 姿态生成算法

工件抛磨的材料去除量受很多因素的影响^[14]。工具与工件接触压力越大,相对线速度越大,抛磨驻留时间越长,都会使得材料去除量越大。其中,相对线速度指的是工具相对于工件运动的线速度,它与机器人的运行速度、工具抛磨头的旋转速度以及旋转方向有关。驻留时间则与机器人运行速度有关。机器人运行速度越大,驻留时间越小。因此,适当减小机器人运行速度可增加材料去除量。另外,工具转速加快,可增加单位时间内工件上某一点与工具的接触量,抛磨总次数越多可增加工件上某一点与工具的总接触量,也会增加工件的材料去除量。因此,为了研究各抛磨因素对工件抛磨的影响,通常将其它抛磨参数保持一定,只改变其中某一因素。在本文中,为了得到均匀的材料去除量,获得良好的表面质量,在其它条件一定的情况下,研究如何使抛磨轮与工件自由型面的接触压强得到良好的控制。当工具与工件的接触力一定时,接触面积变化,接触压强也会随之变化,这将导致工件表面受力不均,材料去除量不均衡。因此,在复杂曲面抛磨加工过程中,如何使抛磨轮在抛磨点处始终与曲面保持最大接触是影响抛磨效果的一个很重要的因素。

对于复杂曲面上的一个给定点 Q , 选取一个单位法向量, 过该法向量可以有无限多个法平面, 每个法平面与曲面相交, 均可以得到一条平面曲线, 每条曲线在 Q 点的曲率一般不相同, 这些曲率衡量了曲面在 Q 点的不同方向的弯曲程度。其中, 这些曲率中的最大值和最小值, 称为主曲率, 记作 k_{\max} 和 k_{\min} , 其所对应的方向称为主方向, 两个主方向是相互垂直的。当抛磨轮支撑轴方向沿 Q 点法向量, 轴向沿最小主曲率方向, 即抛磨轮轴向沿着与工件最贴合方向, 即可实现工具与曲面的最大接触。因此, 法向量和最大、最小主曲率方向组成了在 Q 点的最大接触抛磨姿态。

高斯曲率 K 为曲面 $p(u, v)$ 上一点的最大主曲率 k_{\max} 和最小主曲率 k_{\min} 之积, 平均曲率 H 为主曲率的平均值。可以推导出:

$$K = k_{\min} k_{\max} = \frac{LN - M^2}{EG - F^2}, \quad (3)$$

$$H = \frac{k_{\min} + k_{\max}}{2} = \frac{EN - 2FM + GL}{2(EG - F^2)}. \quad (4)$$

两个主曲率分别为:

$$k_{\min} = H - \sqrt{H^2 - K}, \quad (5)$$

$$k_{\max} = H + \sqrt{H^2 - K}, \quad (6)$$

式中: E, F 和 G 为 NURBS 曲面 $p(u, v)$ 的第一基本量, L, M 和 N 为第二基本量。其中:

$$\begin{bmatrix} E & F \\ F & G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial u} \frac{\partial p}{\partial u} & \frac{\partial p}{\partial u} \frac{\partial p}{\partial v} \\ \frac{\partial p}{\partial v} \frac{\partial p}{\partial u} & \frac{\partial p}{\partial v} \frac{\partial p}{\partial v} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} L & M \\ M & N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n \frac{\partial^2 p}{\partial u^2} & n \frac{\partial^2 p}{\partial u \partial v} \\ n \frac{\partial^2 p}{\partial v \partial u} & n \frac{\partial^2 p}{\partial v^2} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

n 即为 NURBS 曲面在点 $p(u_0, v_0)$ 处切平面的法向量。

$$n(u_0, v_0) = \frac{p_u(u_0, v_0) \times p_v(u_0, v_0)}{|p_u(u_0, v_0) \times p_v(u_0, v_0)|}. \quad (9)$$

主方向由 $\frac{du}{dv}$ 确定, 方程为:

$$\begin{vmatrix} dv^2 & -dudv & du^2 \\ E & F & G \\ L & M & N \end{vmatrix} = 0. \quad (10)$$

式(10)展开, 有:

$$(EM - LF) \left(\frac{du}{dv} \right)^2 - (LG - EN) \frac{du}{dv} + (FN - MG) = 0. \quad (11)$$

由式(11)推导可得:

$$\left(\frac{du}{dv} \right)_{1,2} = \frac{LG - EN \pm \sqrt{(LG - EN)^2 - 4(EM - LF)(FN - MG)}}{2(EM - LF)}. \quad (12)$$

因此, 当主方向的 $\frac{du}{dv}$ 已知, 曲面上任意一点的两个主方向可以表示为:

$$e_{1,2} = \frac{\frac{\partial p}{\partial u} \left(\frac{du}{dv} \right)_{1,2} + \frac{\partial p}{\partial v}}{\left| \frac{\partial p}{\partial u} \left(\frac{du}{dv} \right)_{1,2} + \frac{\partial p}{\partial v} \right|}. \quad (13)$$

求得叶片型面抛磨点的法向量及最大、最小主曲率方向。调整控制抛磨工具以该姿态与工件接触, 即 Y_p 与 e_2 平行, X_p 与 e_1 重合。如图 3 所示。

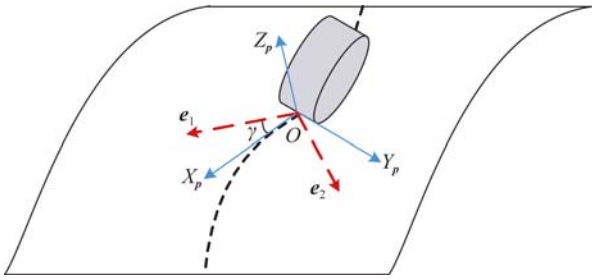


图 3 主曲率方向抛磨姿态

Fig. 3 Grinding posture with main curvature direction

3 坐标转换

图 4 所示为机器人抛磨系统坐标系之间的转换关系。其中, $O_b-X_b Y_b Z_b$ 为机器人基坐标系, $O_{wp}-X_{wp} Y_{wp} Z_{wp}$ 为工件坐标系, $O_6-X_6 Y_6 Z_6$ 为机器人 TCP 坐标系, $O_t-X_t Y_t Z_t$ 为抛磨工具坐标系, 另外在工件抛磨点建立局部坐标系 $O-X_p Y_p Z_p$ 和 $O-X_{pt} Y_{pt} Z_{pt}$ 。

机器人的抛磨运行程序一般实现的是对机器人 TCP 相对于基坐标系的位姿规划。由图 3 可知, 机器人基坐标系与 TCP 坐标系的变换关系可以通过以下变换得到, 即:

$$\mathbf{T}_6^b = \mathbf{T}_{wp}^b \mathbf{T}_p^{wp} \mathbf{T}_{pt}^p \mathbf{T}_t^t \mathbf{T}_6^t, \quad (14)$$

其中: \mathbf{T}_{wp}^b 可通过标定获得, 因此, 可以将 \mathbf{T}_6^b 的求解分解为求从工件坐标系到工具坐标系的变换 \mathbf{T}_t^{wp} 以及工具坐标系到 TCP 坐标系的变换 \mathbf{T}_6^t 。

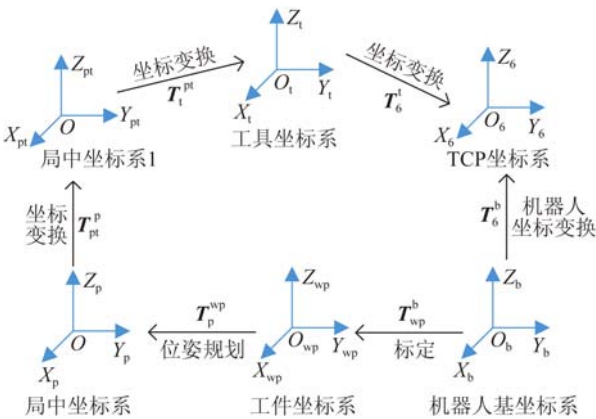


图 4 机器人抛磨系统坐标转换

Fig. 4 Coordinate transformation of robotic grinding system

3.1 工件坐标系到抛磨工具坐标系转换

假设叶片上一点 P 在工件坐标系 $\{obj\}$: $O_{wp}-X_{wp} Y_{wp} Z_{wp}$ 中的坐标为 $P(x_p, y_p, z_p)$, 建立抛磨坐标系如图 5 所示。

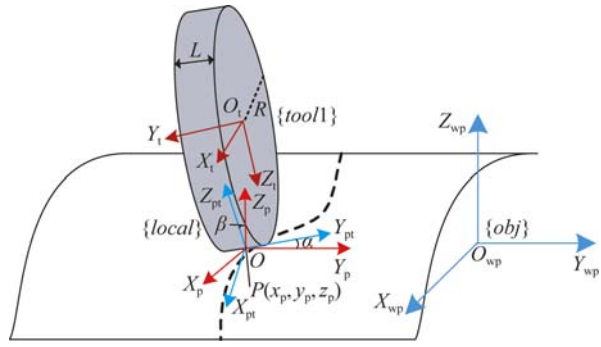


图 5 抛磨坐标系定义

Fig. 5 Grinding coordinate system definition

在抛磨轮中心建立工具坐标系 $\{tool\}$: $O_t-X_t Y_t Z_t$, 在工件上的抛磨点 P 处建立工件局部坐标系 $\{local\}$: $O-X_p Y_p Z_p$, 其中 Z_p 为曲面上 P 点的法向量, X_p, Y_p 分别为抛磨点的最大、最小主曲率方向, 此即为路径规划在 P 点的抛磨姿态。在抛磨工具与工件接触点 P 处建立工具接触点局部坐标系 $\{local1\}$: $O-X_{pt} Y_{pt} Z_{pt}$, 其中 Z_{pt} 与工具坐标系中 Z_t 反向, X_{pt} 与 X_t 同向。

根据坐标系定义可知, \mathbf{T}_p^{wp} 是当前抛磨点基于工件坐标系的描述。为了获得 \mathbf{T}_t^{wp} , 还要求得 \mathbf{T}_{pt}^p 和 \mathbf{T}_t^t 。首先描述坐标系 $\{local\}$ 与 $\{local1\}$ 的关系。从图 4 可知, $O-X_p Y_p Z_p$ 与 $O-X_{pt} Y_{pt} Z_{pt}$ 的相对位置可用角度 α 和 β 表示。实际抛磨时, 为了保证抛磨法向接触, 令 Z_p 和 Z_{pt} 同向, 即 $\beta=0^\circ$ 。则有 $O-X_p Y_p Z_p$ 与 $O-X_{pt} Y_{pt} Z_{pt}$ 的齐次坐标变换为:

$$\mathbf{T}_{pt}^p = \text{rot}(z, \alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

由于局部坐标系 $\{local1\}$ 建立在工具与工件的接触点上, 其坐标轴 X_{pt} 与 X_t 同向, Y_{pt} 与抛磨轮的轴向平行 (与 Y_t 反向), Z_{pt} 与 Z_t 反向。因此, 可以得出 $\{local1\}$ 到 $\{tool\}$ 的变换为: 先绕 X_t 旋转 180° , 再沿 $-Z_t$ 平移 R 。所以, 有:

$$\mathbf{T}_t^t = \text{rot}(x, 180^\circ) \text{trans}(0, 0, -R) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

因此, 综合式(15)和(16), 可得工件坐标系内

各点到工具坐标系的转换关系为:

$$\mathbf{T}_i^p = \mathbf{T}_{pt}^p \mathbf{T}_i^p = \text{Rot}(z, \alpha) \text{Rot}(x, 180^\circ) \text{trans}(0, 0, -R) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & -\cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

3.2 抛磨工具坐标系转换到机器人 TCP 坐标系转换

柔性装置安装于机器人工具中心点(TCP), TCP 处坐标系为 $\{tool0\}: O_6-X_6Y_6Z_6$ 。柔性装置上固定抛磨工具。抛磨工具中心点坐标系为 $\{tool1\}$,从图 6 中可以看出,从抛磨工具中心点坐标系到 TCP 坐标系变换为一个平移变换。

$$\mathbf{T}_6^i = \mathbf{T}(0, 0, -(h_1 + h_2)), \quad (18)$$

其中 h_2 为柔性装置末端中心点到抛磨工具中心点的距离,该参数为常量。 h_1 为机器人工具中心点到抛磨工具中心点高度,柔性装置内气缸伸缩,使得装置在 x 范围内可调。 x 的被动调整用于保证抛磨力 F 在一定的范围内保持恒定。因此, h_1 随 x 的变化而变化,表示为:

$$h_1 = f(x). \quad (19)$$

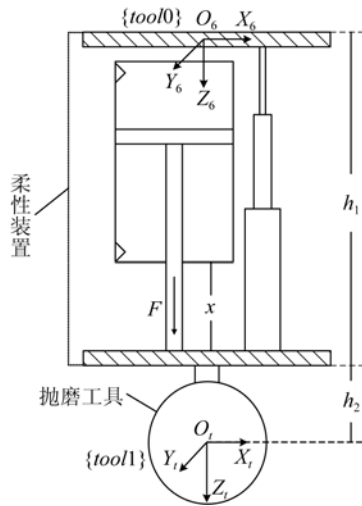


图 6 柔性抛磨工具

Fig. 6 Flexible grinding tool

因此,从抛磨工具坐标系到机器人 TCP 坐标系的转换关系可表示为:

$$\mathbf{T}_6^i = \mathbf{T}(0, 0, -(f(x) + h_2)) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -f(x) - h_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

4 仿真与实验验证

4.1 抛磨系统仿真

机器人柔性抛磨系统完成一个叶片从建模到抛磨加工的流程如图 7 所示。

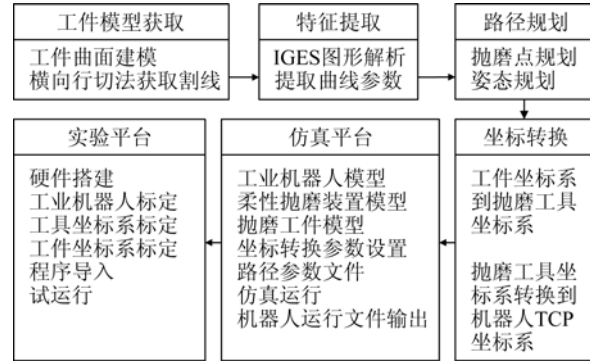


图 7 机器人柔性抛磨系统流程图

Fig. 7 Flow chart of robot flexible grinding system

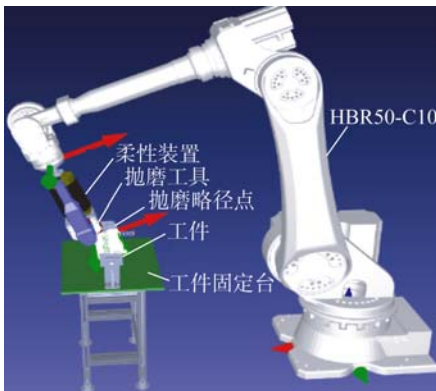
从图中可知,仿真平台的作用有两个:一是验证路径数据的可行性,二是为了生成工件的抛磨路径程序。机器人抛磨系统平台如图 8(a)所示,工业机器人 A,型号为 HBR50-C10,该工业机器人负载能力为 50 kg,工作范围 2.1 m,重复定位精度为 0.08 mm;自行研制的柔性装置 B,保持作用于工件的抛磨力恒定;抛磨工具 C、待加工工件 D 及工件固定台 E。在 RoboDK 中搭建相应的柔性抛磨平台。导入机器人模型、柔性装置模型、抛磨工具模型和待抛磨工件模型,如图 8(b)所示。

两种方法生成的抛磨路径局部放大图如图 9 所示。将工件模型导入该 CAM 软件,选择合适的刀具、加工工序及参数,生成刀轨文件,提取刀轨中位置和姿态数据在 Matlab 中处理后显示如图 9(a)所示。图 9(b)为基于工件的 NURBS 曲面模型规划所得抛磨路径。从图中可以看出,两种规划方式所得抛磨点在工件弯曲较大区域抛磨点均较密集,较平坦区域抛磨点较稀疏。但从抛磨姿态来看,图 9(a)中抛磨点姿态不论曲面曲率如何变化, X 轴始终从当前抛磨点指向相邻抛磨点,而图 9(b)中,抛磨姿态会随着曲面曲率的变化而进行调整。根据上文的姿态规划算法可知,

抛磨点的 X 轴方向为该点最大主曲率方向, Y 轴方向为最小主曲率方向, 从而使得工具可以与工件保持更紧密地接触。



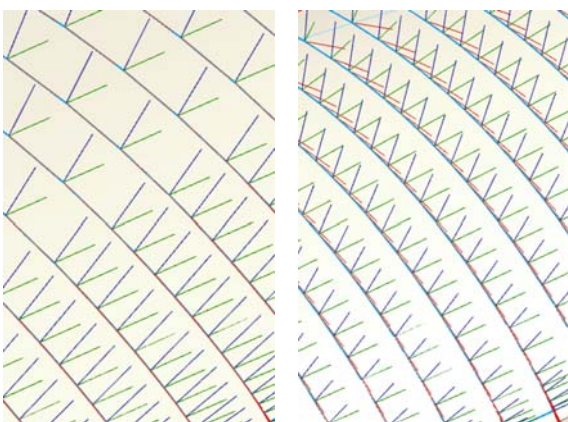
(a) 抛磨实验平台
(a) Grinding experiment platform



(b) 抛磨仿真平台
(b) Grinding simulation platform

图 8 机器人抛磨系统

Fig. 8 Robotic grinding system



(a) CAM 规划的路径 (b) 基于 NURBS 曲面规划的路径
(a) Path planned by CAM (b) Path planned based on NURBS surface

图 9 2 种方法生成的抛磨路径

Fig. 9 Grinding path generated by two methods

4.2 实验验证

为了验证该规划方法的有效性, 进行两组抛磨实验: (1) 对工件进行定点抛磨实验。抛磨力 $F=5\text{ N}$, 砂圈目数 600 mesh, 宽度 20 mm, 工具头转速 1 000 r/min, 驻留时间 5 s。在叶片上一点 H, 分别采用 CAM 软件规划的姿态和本文推导的最大接触姿态进行抛磨加工。所得抛磨效果如图 10 所示。从图 10(a) 可以看出, 接触面左侧抛磨痕迹较右侧稀疏, 且宽度较小, 说明在 H 点采用此姿态抛磨时, 工具左边接触不够充分。而图 10(b) 采用最大接触姿态抛磨, 可见整个接触面宽度一致性较好, 抛磨条纹较均匀。整体对比来看, 图 10(b) 抛磨接触面积要大于图 10(a), 且抛磨均匀性也优于图 10(a); (2) 对叶片工件进行抛磨加工。分别采用两种方法规划所得位姿进行抛磨加工。加工过程中, 机器人运行线速度 10 mm/s, 抛磨力 $F=5\text{ N}$, 抛磨重复次数 5 次。其它抛磨工艺参数见表 1。得到两种加工路径抛磨效果如图 10 所示。



(a) CAM 软件规划姿态抛磨
(a) Grinding with CAM software planning posture



(b) 最大接触姿态抛磨
(b) Grinding with maximum contact posture

图 10 两种姿态定点抛磨接触面对比

Fig. 10 Comparison of fixed point grinding contact surface of two types of posture

表 1 抛磨工艺参数

Tab. 1 Grinding process parameters

名称	砂圈			转速 $/(r \cdot \text{min}^{-1})$	工件材质
	目数 /mesh	半径 /mm	宽度 /mm		
参数	600	60	20	1 000	铝合金



(a)CAM 软件规划路径抛磨效果

(a)Grinding effect of planned path by CAM



(b)基于 NURBS 曲面规划的路径抛磨效果

(b)Grinding effect of planned path based on NURBS

图 11 抛磨效果对比图

Fig. 11 Comparison of grinding effect

图 11(a)为根据 CAM 软件规划的加工轨迹提取出的路径文件进行抛磨加工的效果图,图 11(b)为在相同的抛磨工艺参数下通过最大接触原则算法规划的路径位姿进行抛磨加工的抛磨效果。从图中可以看出,图 11(a)工件表面可见明显加工痕迹,图 11(b)工件表面仅微可辨抛磨方向。可见抛磨工具与路径上抛磨点的贴合程度对抛磨效果影响明显。在叶片表面分别取 16 个点,如图 11 所示。使用三丰粗糙度仪 SJ-210 分别进行粗糙度检测, $p(u_i, v_i)$ 检测曲线如图 12 所示,详细检测结果如表 2、表 3 所示。

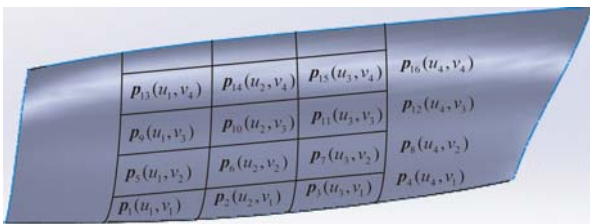


图 12 粗糙度检测点示意图

Fig. 12 Diagram of roughness detection points

两种抛磨路径加工方式测得的 16 组粗糙度 (Ra)的平均值分别为 $2.973 1 \mu\text{m}$ 和 $0.799 4 \mu\text{m}$,标准差分别为 $0.154 6 \mu\text{m}$ 和 $0.090 1 \mu\text{m}$ 。数据表明,基于 NURBS 曲面模型规划的路径的抛磨效果在光洁度和均匀性方向均明显优于 CAM 软件规划的路径。并且,从 u 、 v 两个方向的测量结果比较可以发现,前者在两个方向的粗糙度和标

准差均较小,说明其不仅在同一条路径具有良好的表面一致性,而且在整个抛磨路径的一致性仍然较好,从而避免了出现明显的过抛和欠抛现象。实验结果验证了基于 NURBS 曲面模型的路径规划方法的有效性。

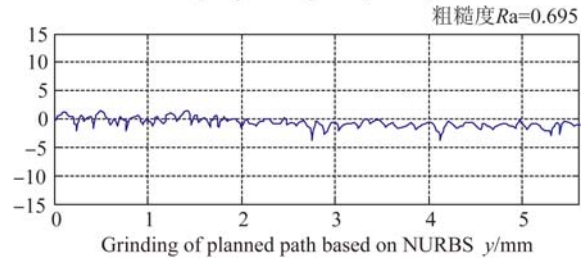
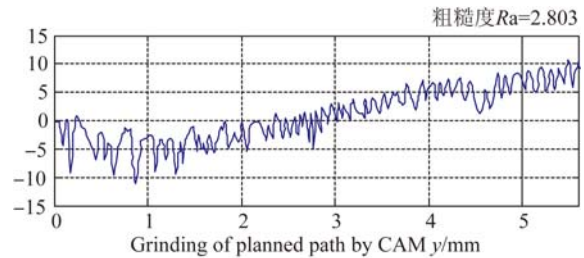


图 13 抛磨效果对比

Fig. 13 Comparison of grinding effect

表 2 CAM 规划路径抛磨粗糙度 Ra

Tab. 2 Roughness of grinding with CAM planning path(Ra) (μm)

$p(u, v)$	v_1	v_2	v_3	v_4	平均值	标准差
u_1	2.803	2.917	3.016	2.885	2.905 3	0.088 1
u_2	3.203	2.943	2.817	2.826	2.947 3	0.179 9
u_3	2.968	3.233	3.154	2.815	3.042 5	0.188 0
u_4	3.243	2.869	2.886	2.991	2.997 3	0.172 5
平均值	3.054 3	2.990 5	2.968 3	2.879 3	2.973 1	
标准差	0.206 8	0.164 5	0.148 8	0.080 6		0.154 6

表 3 基于 NURBS 曲面路径抛磨粗糙度 Ra

Tab. 3 Roughness of grinding with path based on NURBS surface(Ra) (μm)

$p(u, v)$	v_1	v_2	v_3	v_4	平均值	标准差
u_1	0.695	0.891	0.777	0.730	0.773 3	0.085 0
u_2	0.663	0.835	0.896	0.828	0.805 5	0.099 8
u_3	0.715	0.930	0.865	0.796	0.826 5	0.092 3
u_4	0.671	0.914	0.859	0.726	0.792 5	0.113 1
平均值	0.686 0	0.892 5	0.849 3	0.770	0.799 4	
标准差	0.023 6	0.041 5	0.050 8	0.050 3		0.090 1

5 结 论

本文提出一种基于 NURBS 曲面模型的复杂曲面抛磨路径规划方法。以横向行切法对 NURBS 曲面进行切割,获得割线轨迹以 NURBS 曲线进行描述。根据抛磨工艺对抛磨点密集度的要求,确定阈值 ϵ ,进而求取每条曲线上的抛磨点。使得在曲率较大的区域,抛磨点密集,曲率较小区域,抛磨点较稀疏。然后推导了 NURBS 曲面上各抛磨点的抛磨姿态。为取得最佳抛磨效果,使抛磨工具支撑轴方向沿叶片型面法向量方

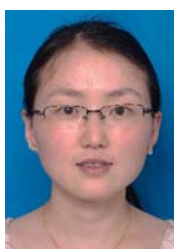
向、工具头轴线方向沿接触点最小主曲率方向。推导了路径参数从工件坐标系变换到工具坐标系,再变换到机器人 TCP 坐标系的转换关系,为仿真平台的搭建做准备。搭建了基于 RoboDK 的柔性抛磨系统仿真平台,通过仿真运行验证了本文路径规划算法的可行性和有效性。并生成了用于实际工业机器人抛磨系统的运行程序。经抛磨实验对比,基于 NURBS 曲面模型规划的路径和 CAM 规划的路径进行抛磨加工,工件粗糙度分别为 $0.695\sim 0.930\ \mu\text{m}$ 和 $2.803\sim 3.243\ \mu\text{m}$ 。实验证明了该路径规划方法的有效性。

参考文献:

- [1] 苏将兵,廖宏谊,苏卿双. 机器人模具抛光的研究现状与发展趋势 [J]. 模具工业, 2012, 38(6): 63-66.
SU J B, LIAO H Y, SU Q SH. The current status and development trend in research of robotic polishing system for die and mould [J]. *Die & Mould Industry*, 2012, 38(6): 63-66. (in Chinese)
- [2] NAGATA F, KUSUMOTO Y, FUJIMOTO Y, et al.. Robotic sanding system for new designed furniture with free-formed surface [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2007, 23(4): 371-379.
- [3] 李龙响,郑立功,邓伟杰,等. 应用四轴联动磁流变机床加工曲面 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 2819-2826.
LI L X, ZHENG L G, DENG W J, et al.. Magnetorheological finishing for curve surface based on 4-axis machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 2819-2826. (in Chinese)
- [4] 张恩忠,赵继,冀世军,等. 基于正交与插值算法的精密抛光平台综合误差建模与补偿 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(12): 3422-3429.
ZHANG E ZH, ZHAO J, JI SH J, et al.. Comprehensive error modeling and compensation for precision polishing platform based on orthogonal experiment and interpolation algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(12): 3422-3429. (in Chinese)
- [5] 谭福生,葛景国. 力控制技术在机器人打磨中的应用及系统实现 [J]. 上海电气技术, 2008, 1(2): 35-40, 48.
TAN F SH, GE J G. Research on force-control-based robotic machining and its package implementation [J]. *Journal of Shanghai Electric Technology*, 2008, 1(2): 35-40, 48. (in Chinese)
- [6] TIAN F J, LV CH, LI ZH G, et al.. Modeling and control of robotic automatic polishing for curved surfaces [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2016, 14: 55-64.
- [7] 刘广保. 大型复杂曲面的机器人研抛技术研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2015.
LIU G B. *Research of robotic grinding and polishing technology for large freeform surface* [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2015. (in Chinese)
- [8] 张海洋,杨文玉,张家军,等. 叶片机器人砂带磨抛的轨迹规划研究 [J]. 机电工程, 2014, 31(5): 578-581, 586.
ZHANG H Y, YANG W Y, ZHANG J J, et al.. Trajectory planning for robotic belt grinding of turbine blade [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(5): 578-581, 586. (in Chinese)
- [9] 石璟,张秋菊. 六轴联动叶片砂带抛磨中接触轮姿态的确定 [J]. 机械科学与技术, 2010, 29(2): 196-200.
SHI J, ZHANG Q J. Determination of contact wheel position and orientation for six-axis blade CNC abrasive belt grinding system [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2010, 29(2): 196-200. (in Chinese)
- [10] RADZEVICH S P. A closed-form solution to the problem of optimal tool-path generation for sculptured surface machining on multi-axis NC machine [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2006, 43(3-4): 222-243.

- [11] WANG W, YUN CH. A path planning method for robotic belt surface grinding [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2011, 24(4): 520-526.
- [12] HAN L L, ZHANG Q W, JIA K. A method for path generation of robot automatic polishing based on bounding box [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 490-495: 24-28.
- [13] 王飞, 张健, 彭利荣, 等. 气囊抛光过程的运动精度控制 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(8): 2220-2228.
- WANG F, ZHANG J, PENG L R, *et al.*. Motion-precision control in bonnet-polishing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 2220-2228. (in Chinese)
- [14] 樊成. 光学曲面确定性抛光的面型精度控制研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- FAN CH. *Investigation on Control of Surface Form Accuracy for Deterministic Polishing of Optical Part Surfaces* [D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)

作者简介:



黄 婷(1984—),女,江西鄱阳人,博士研究生,工程师,2005年、2008年于南昌航空大学分别获得学士、硕士学位,主要从事工业机器人控制与应用方面的研究。E-mail: hting104@163.com

导师简介:



孙立宁(1964—),男,黑龙江哈尔滨人,博士生导师,教授,长江学者,1985年、1988年、1993年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事纳米级微驱动及微操作机器人、高速高精度机构、工业机器人技术、并联机器人、医疗机器人、微小型机器人、仿人手臂及机器人机构与控制方面的研究。E-mail: lnsun@hit.edu.cn

通讯作者:



陈国栋(1983—),男,山东济宁人,博士后,副教授,2005年于大连铁道学院获得学士学位,2007年、2011年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事工业机器人、服务机器人及机器视觉方面的研究。E-mail: chenguodong@suda.edu.cn