

基于逆向工程的机器人磨削叶片

赵扬¹, 赵继¹, 张雷¹, 齐立哲²

(1. 吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130022; 2. 廊坊智通机器人系统有限公司, 河北 廊坊 065001)

摘要:提出了一种基于逆向工程的机器人磨削叶片加工方法。机器人逆向工程系统对叶片进行扫描, 获得具有叶片型面几何信息的点云数据, 利用逆向建模技术生成叶片的逆向 CAD 模型, 并依此采用等距轨迹法进行机器人磨削加工的路径规划, 生成机器人加工轨迹。最后, 将生成的轨迹应用于机器人叶片磨削系统, 试验验证了方法的有效性和可行性。

关键词:机械制造自动化; 逆向工程; 叶片磨削; 工业机器人; 路径规划

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5497(2009)05-1176-05

Robotic blade grinding based on reverse engineering

ZHAO Yang¹, ZHAO Ji¹, ZHANG Lei¹, QI Li-zhe²

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Inter-Smart Robotics System Co., Langfang 065001, China)

Abstract: To solve the problem of automatic blade grinding, a method for robotic blade grinding based on the reverse engineering was proposed. Scanned by a robotic reverse engineering system, the point data with the geometrical information of the blade profile was acquired. A CAD model of the blade was reconstructed by the reverse modeling technique, the isometric trajectory method was employed to proceed the path plan of robotic grinding, and generate the robotic grinding trajectory. The robotic blade grinding experiments were carried out by the generated trajectory to prove the proposed method effective and feasible.

Key words: mechanical manufacture and automation; reverse engineering; blade grinding; industrial robot; path planning

叶片是汽轮机、水轮机以及航空发动机等透平机械的重要组成部分^[1]。目前, 叶片磨削加工主要以技术工人的手工操作为主, 加工效率低、成本高、质量无法保证, 而且磨削加工的噪声大、粉尘多, 严重影响工作人员的健康^[2]。使用机器人替代人工在恶劣工况下工作, 不仅可以提高生产效率、降低劳动成本, 同时还可实现整个

加工过程的自动化。针对机器人磨削自动化, 国内外许多学者做了很多卓有成效的研究^[3-7]。

自动化磨削叶片需要叶片的 CAD 模型来规划整个加工过程, 但有些情况下, 叶片型面 CAD 信息是未知的, 例如针对磨损叶片的修复加工。由于叶片型面大多为自由曲面, 通过简单测量来获取叶片 CAD 的精确模型是不可能的。在此情

收稿日期: 2008-08-26.

基金项目: “863” 国家高技术研究发展计划项目 (2007AA04Z243, 2006AA04Z214); 国家自然科学基金项目 (50575092).

作者简介: 赵扬 (1980-), 男, 博士研究生. 研究方向: 智能精密制造. E-mail: joszy1213@sohu.com

通信作者: 赵继 (1959-), 男, 教授, 博士生导师. 研究方向: 精密加工技术与智能机器人技术. E-mail: jzhao@jlu.edu.cn

况下,采用逆向测量的方法可得到叶片工件的逆向 CAD 模型,并以此来规划加工路径进行加工,不失为一种可行的方法。同时,通过机器人示教的方式来规划机器人加工路径显然无法满足叶片复杂型面加工精度要求,因此为机器人自动规划加工路径也成为自动化磨削叶片的关键环节。本文提出了一种基于逆向工程的叶片磨削加工方法,为机器人自动化磨削叶片提供了一种可行的解决方案。

1 机器人逆向工程系统

在机器人逆向工程测量系统中,采用线激光三维扫描仪作为测量工具,整个系统对叶片进行扫描的基本原理为:激光扫描仪安装在固定工作台上,机器人抓持叶片在扫描仪工作范围内连续移动并变换不同姿态,扫描仪的激光线条连续扫描叶片表面,并计算图像线条中心得到叶片表面的三维点云数据。图 1 为机器人逆向工程测量系统示意图。

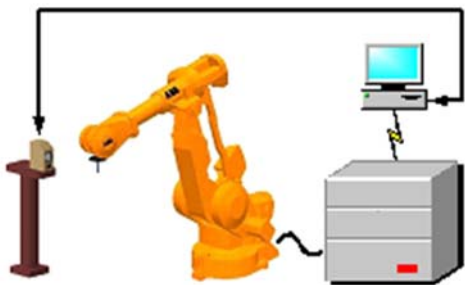


图 1 机器人逆向工程测量系统

Fig. 1 Robotic reverse engineering system

单点式激光测量法的测量原理^[8]如图 2 所示。扫描仪激光器发射的激光与物体被测面的法线成一定角度,另一侧用一透镜接收光点在被测面的散射光或反射光,若光点的像在探测器敏感面上移动,则物体表面沿法线方向移动的距离 x 为

$$x = \frac{ax' \cos \theta_1}{b \sin(\theta_1 + \theta_2) - x' \cos(\theta_1 + \theta_2)} \quad (1)$$

式中: a 为激光束光轴和接收透镜光轴的交点到接收透镜前主面的距离; b 为接收透镜后主面到成像面中心点的距离; θ_1 为激光束光轴和被测面的法线夹角; θ_2 为成像透镜光轴与被测面的法线夹角。线激光测量则需计算光敏面曲线各像素点偏离标准像的位置。

测量系统中,需建立扫描仪坐标系来获取激

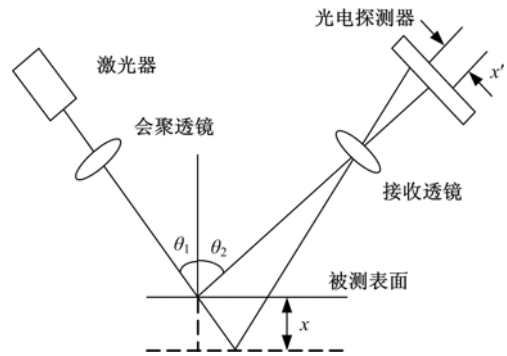


图 2 激光扫描仪测量原理

Fig. 2 Principle of laser measurement

光扫描仪与机器人的相对位置关系以及进行相对位置的外部标定。图 3 为各坐标系的位置关系。建立世界坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 为了便于计算,将世界坐标系与机器人基坐标系重合,则世界坐标系的 $O_w Z_w$ 轴竖直向上, $O_w X_w$ 轴方向沿机器人零点正向, $O_w Y_w$ 通过右手定则确定,坐标原点为机器人基坐标系的原点。建立扫描仪坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$,机器人基坐标系到扫描仪坐标系的变换关系,即世界坐标系到扫描仪坐标系的变换关系为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \mathbf{T} \quad (2)$$

式中: \mathbf{R} 为正交旋转矩阵; \mathbf{T} 为位置平移矢量。

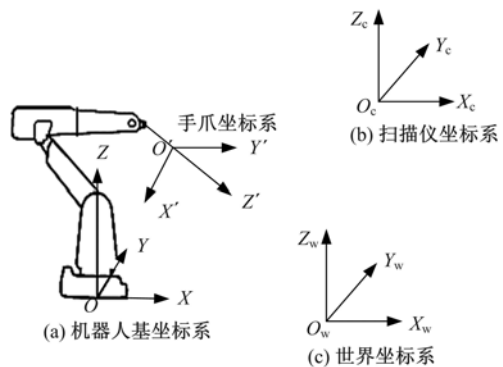


图 3 各坐标系的位置关系

Fig. 3 Position relations among each coordinate

2 叶片逆向模型重建

通过激光扫描仪测得的具有叶片型面几何信息的点云数据生成叶片逆向 CAD 模型,模型的重构方法具体可分为以下 2 个步骤。

(1)测量点云预处理与三角化

测量数据预处理是逆向工程 CAD 建模的关

键环节,它的结果将直接影响后期重建模型的质量^[9]。点云的预处理过程主要包括多视拼合、噪声处理和数据精简三个方面,整体流程见图 4。

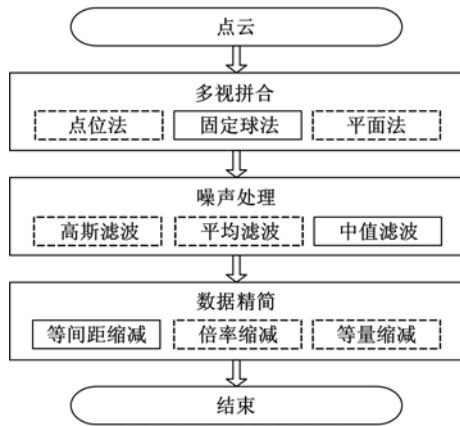


图 4 测量点云预处理流程

Fig. 4 Pre-process flow of point clouds

为了检查和修补点云数据之间过大的缝隙以及点云缺失和扫描干涉所形成的点云孔洞,需要对点云数据进行三角网格化。点云数据的三角网格化是将数据点连接成三角面片,形成多面体实体模型。三角网格化的要求是保持整个数据表面平滑而且可以较好地维持细节特征。网格化过程同时还需要进行简化处理,以解决三角面片的重叠问题和排除不需要的节点和面片。

(2) 叶片曲面拟合与重构

对于含有自由曲面的复杂型面,用一张曲面来拟合所有的数据点是不可行的,需按原模型所具有的特征将测量数据点分割成不同的区域,分别拟合成不同的曲面片,然后应用曲面求交和面间过渡的方法将不同的曲面片连接起来构成完整模型^[10]。

对曲面进行重构常用的曲面模型有 Bézier 曲面和 NURBS 曲面。NURBS 方法可以为自由曲面和规则曲面提供统一的数学描述,本文采用 NURBS 方法对叶片曲面进行重构,NURBS 曲面的数学模型为

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \omega_{ij} P_{ij}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \omega_{ij}} \quad (3)$$

式中: P_{ij} 为控制顶点; $N_{i,p}(u)$ 、 $N_{j,q}(v)$ 分别为 p 次和 q 次 B 样条基函数; ω_{ij} 为与控制顶点相关的权因子。

将数据测量点与沿其法向在拟合曲面上上所

应的点之间的距离定义为曲面的拟合误差,误差的数学模型为

$$d = [(X_{ij} - S_{ij}^x(u, v))^2 + (Y_{ij} - S_{ij}^y(u, v))^2 + (Z_{ij} - S_{ij}^z(u, v))^2]^{1/2} \quad (4)$$

式中: d 为曲面的拟合误差; X_{ij} 、 Y_{ij} 、 Z_{ij} 为测量点; S_{ij}^x 、 S_{ij}^y 、 S_{ij}^z 为拟合曲面上所对应的点; $i=1, 2, \dots, n$ 和 $j=1, 2, \dots, m$ 为沿两个测量方向测量点的数目。

3 机器人磨削路径的生成

从机器人程序控制角度来看,规划机器人加工路径只需提供机器人加工点的位置以及机器人在加工点所需的姿态,因此本文针对叶片型面,采用等距轨迹法来规划机器人磨削加工的路径位置点以及机器人在各点的姿态。机器人磨削路径生成算法如下:

(1) 用垂直于叶片轴线的平面 P 截取叶片型面,以二者产生的交线 L 作为机器人的加工路径曲线。

(2) 使用等距法将截面线 L 离散成机器人路径点列 $S, S=\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 。

(3) 计算机器人在每一路径点的空间位姿矢量 N 。

3.1 加工路径点的生成

如图 5 所示,用垂直于叶片轴线的平面 P 截取叶片型面,交线 L 即为机器人加工路径曲线。取 d 作为机器人磨削加工步长,在路径曲线 L 上生成加工路径点列 $S, S=\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$,其中任意相邻两点间距离相等。加工步长 d 的选取要保证机器人在叶片边缘处有足够的加工点。此时所得点列 S 中各点的坐标值 $S_n(x_n, y_n, z_n)$ 为叶片工件坐标系下的坐标,还需经过旋转平移变换到机器人末端手爪坐标系中。

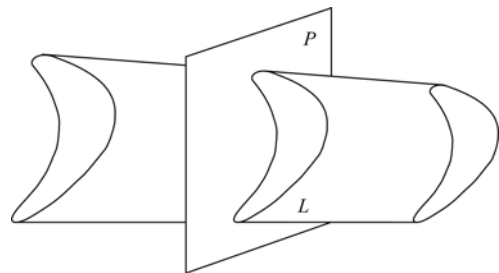


图 5 加工路径曲线

Fig. 5 Curve of grinding path

3.2 加工姿态生成

机器人加工姿态要保证磨削机始终沿叶片曲

面法向进行加工。在机器人空间中,叶片曲面法向量为

$$N = \frac{r_u \times r_v}{|r_u \times r_v|} \quad (5)$$

式中: $r_u = \frac{\partial r}{\partial u}$ 和 $r_v = \frac{\partial r}{\partial v}$ 称为坐标矢量,分别为 u 线和 v 线在加工点的切矢量。

4 机器人叶片磨削试验

在机器人逆向工程测量系统中,扫描仪采用廊坊智通公司的 RobotScan H-200 型线激光三维扫描仪,主要技术参数如下:采样率为 640 点/线;扫描速度为 40 帧/s,(25 600 点/s);激光为半导体二极管;基准距为 110 mm;横向视场为 60 mm;景深为 30~50 mm;测量精度为 0.02 mm。

在机器人叶片磨削系统中,机器人选用 ABB 公司生产的 IRB4400 型六自由度关节型工业机器人,机器人控制器为 IRC5 控制器,机器人负载 45 kg,在其工作空间内可以满足磨削的位姿和速度要求^[11]。磨削机为具有浮动恒压力接触机构的砂带磨削机。图 6 为机器人叶片磨削系统。在加工试验中,需针对叶片榫头数据设计叶片夹具,以满足加工定位精度要求。



图 6 机器人叶片磨削系统

Fig. 6 Robotic blade grinding system

以某航空发动机涡轮叶片为例,通过机器人逆向工程系统对叶片进行数字化测量,得到叶片点云数据。利用逆向工程软件 Geomagic Studio 对点云数据进行处理以及逆向重构操作,得到叶片的逆向 CAD 模型,如图 7 所示。按本文方法对叶片模型生成 3 条机器人试验路径,每条路径含有 28 个机器人加工路径点,如图 8 所示。为了满足加工要求以及提高加工效率,选取满足进排气边加工要求的最短步长来规划加工路径,同时对叶身路径进行稀疏化处理。

根据计算所得的机器人目标点位姿,使用

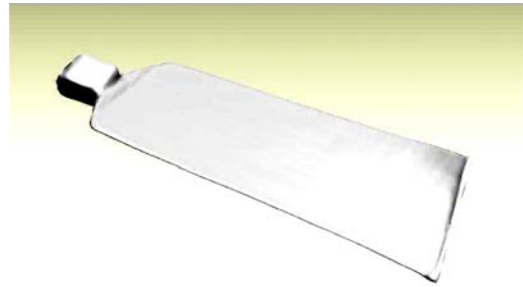


图 7 逆向重构叶片 CAD 模型

Fig. 7 Reconstructed CAD model of blade

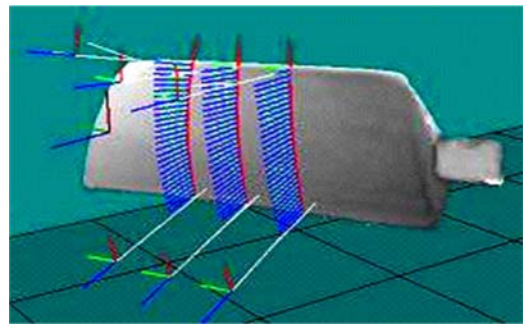


图 8 机器人叶片磨削加工路径

Fig. 8 Grinding path of robotic blade grinding

RAPID 机器人编程语言编写机器人控制程序,实现机器人叶片磨削加工。由于目前的加工要求是需对叶片进行均匀去除,所以在加工过程中必须使叶片路径各点与磨削机的浮动接触轮保持相同的接触量,即磨削机接触轮的浮动机构在每一加工点的压缩量保持一致。利用位移传感器 LVDT(Linear variable differential transformer)对 3 条叶片路径各点与磨削机的接触量进行检测,其中一条路径的检测结果如图 9 所示,可以看出,各路径点与磨削机的接触量基本上保持一致,显示了机器人运动轨迹符合磨削加工要求,验证

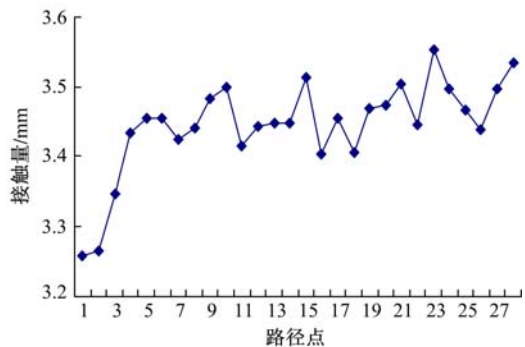


图 9 各路径点与磨削机的接触量

Fig. 9 Contact measurement of each path point on grinding machine

了本文方法的有效性和可行性。

5 结束语

本文针对机器人磨削叶片加工进行了研究,利用机器人逆向工程系统对工件进行非接触测量,快速获得工件形状信息;对工件进行逆向模型重构,进而针对逆向模型生成机器人加工路径;提出了基于逆向模型的机器人磨削路径等距轨迹规划方法;试验验证了本文方法的有效性和可行性。

参考文献:

- [1] 于红英,刘文涛,赵广亮. YP02 型叶片测量仪软件系统开发的关键技术[J]. 机械工程学报,2008,44(4):239-245.
Yu Hong-ying, Liu Wen-tao, Zhao Guang-liang. Key techniques of YP02 blade measuring machine software system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(4): 239-245.
- [2] Fusaomi Nagata, Yukihiko Kusumoto, Yoshihiro Fujimoto, 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] Stephien T M, Sweet L M, Good M C, et al. Control of tool/workpiece contact force with application to robotic deburring[J]. IEEE Journal of Robotics Automation, 1987, 3(1): 7-18.
- [4] Kazerooni H. Robotic deburring of two dimensional parts with unknown geometry[J]. Journal of Manufacturing System, 1988, 7(4): 329-338.
- [5] Her M G, Kazerooni H. Automated robotic deburring of parts using compliance control[J]. ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, 1991, 113: 60-66.
- [6] Bone G M, Elbestawi M A, Lingarkar R, et al. Force control of robotic deburring[J]. ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, 1991, 113: 395-400.
- [7] Gorinevsky D M, Formalsky A M, Schneider A Y U. Force Control of Robotics Systems[M]. New York: CRC Press, 1997.
- [8] 金涛,童水光. 逆向工程技术[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [9] 柯映林. 反求工程 CAD 建模理论、方法和系统[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [10] Werner A, Skalski K, Piszczatowski S, et al. Reverse engineering of free-form surface[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 76: 128-132.
- [11] Product Manual IRB[M]. Sweden: ABB Robotics Corporation, 2000.