

机器人自动研抛系统平台搭建及重力补偿研究

高强¹, 田凤杰¹, 杨林², 李静¹

¹沈阳理工大学; ²中国科学院沈阳自动化研究所

摘要: 为进行复杂曲面工件的柔顺研抛加工,自行搭建了机器人自动研抛系统平台,系统的关键技术之一是实现 ATI 六维力/力矩传感器和 PC 机的在线研抛力控制。通过对传感器测量值进行受力分析,提出研抛工具和连接件的重力补偿算法,用于消除加工过程中重力产生的干扰。采取基于位置内环的力外环柔顺控制策略,以 45 钢曲面工件作为加工对象进行研抛实验。实验结果表明,研抛力在一定范围内保持相对恒定,研抛曲面加工质量稳定,证明了该机器人自动研抛系统平台的可行性,良好地实现了机器人的自动化研抛加工。

关键词: 光整加工; 研抛系统平台; 机器人; 力外环控制; 重力补偿

中图分类号: TG669; TH122

文献标志码: A

Research on Platform of Robot Automatic Polishing System and Gravity Compensation

Gao Qiang, Tian Fengjie, Yang Lin, Li Jing

Abstract: In order to conduct automatic and flexible finishing machining on freeform surface, the robot automatic polishing system platform is built up. One of the key technology of the system is how to realize the on-line polishing force control of the ATI six axis force / torque sensor and PC machine. Through the force analysis of the sensor measurement, the gravity compensation algorithm of the polishing tool and the connecting parts is proposed, which is used to eliminate the interference caused by gravity during machining. A compliance control strategy for force outer loop based on position loop is used. Taken curved surface of 45 steel workpiece as a processing object, the experiments are carried out. The experimental results show that polishing force remained relatively constant within a certain range, The quality of surface after polishing is stable, which proves the feasibility of the robot's automatic polishing system platform, and the automatic polishing operation of the robot is realized well.

Keywords: precision machining; polishing system platform; robotic; force external loop control; gravity compensation

1 引言

随着科学的不断进步和航空航天、军事侦察及造船汽车等制造业的飞速发展,市场对产品的性能以及外观的要求越来越高,而研磨抛光往往是机械加工过程中的最终工序,直接决定产品的加工质量。目前我国复杂曲面零件光整加工阶段的研抛加工基本以人工操作为主,加工质量难以得到有效的保证,效率很低。而且大部分工作环境恶劣,存在大量的噪音粉尘,因此吸引了较多的学者从事自动研抛设备及工艺的研究和开发^[1-3]。

对于复杂曲面工件研抛加工,加工系统平台本体基本有两种方案:数控机床和工业机器人。与工业机器人相比,数控机床在刚度、定位精度、和运动耦合方面都有较大的优势。但是工业机器人柔性很大且布置灵活,最重要的是成本比较低,因此越来越多的学者开始关注工业机器人^[4]。对于研抛此类

的光整加工,仅仅有位置控制是完全不够的,还要对机器人末端执行器和工件的研抛力进行控制。由 Preston 理论可知,研抛工具和工件的接触压力(即研抛力)是影响工件加工质量的主要因素,所以机器人研抛加工的核心技术之一就是如何实现研抛力的控制^[5-6]。本文应用工业机器人和 ATI 力/力矩传感器等自行搭建了基于位置内环的力外环柔顺控制策略的机器人研磨抛光系统平台,为消除加工过程中研抛工具和连接件的重力干扰,提出了重力补偿算法,并采用 45 钢曲面工件为对象对重力补偿后的系统平台进行了研抛加工实验。

2 机器人自动研抛系统平台的搭建

为完成复杂曲面工件的柔顺研抛加工,搭建了如图 1 所示的机器人自动研抛系统平台。该平台主要由六自由度工业机器人本体、PC 机、机器人控制柜、研抛工具(气动马达、橡胶海绵研抛装置、连接件)、ATI 六维力/力矩传感器和工作台等组成。

ATI 六维力/力矩传感器安装在研抛工具和机器人第六轴末端的法兰之间,用来测量研抛加工过

基金项目: 沈阳市科技创新专项资金资助项目(F13-020-2-00)
收稿日期: 2015 年 5 月

程中研抛力及力矩的大小。机器人、力传感器与 PC 机之间通讯方案包含两部分工作线程: 控制计算机—机器人运动控制器工作线程和控制计算机—六维力传感器工作线程, 用来实现它们三者之间的通讯连接, 同时在线控制研抛力以及实现机器人离线路径规划。ATI 六维力/力矩传感器的工作原理是当研抛工具和工件接触时, 六维力传感器采集测量应变信号, 经由 Net F/T 调制器进行信号放大、滤波处理后输出可以识别的数字信号, 并通过以太网将信息传递给 PC 机。研抛加工过程描述为: ①使用 CAD/CAM 软件建立加工工件的模型, 将其导入计算机上的路径规划软件中, 生成机器人识别的语言程序, 并由计算机将加工路径程序载入到机器人控制器中, 机器人就会按照要求的路径轨迹进行加工。②ATI 六维力传感器实时测量采集研抛力信息, 并将数据通过通讯实时传递给计算机, 计算机对测量值进行处理, 并通过控制算法将设定的研抛力和实际研抛力的差值转化为机器人末端的位置修正量, 并传递给机器人位置控制器, 驱动机器人调整末端研抛工具的位姿, 对研抛力进行实时补偿, 从而保证整个加工过程处于相对恒定的研抛力加工范围。

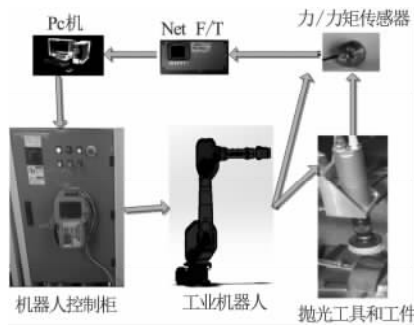


图1 机器人研抛系统平台

3 研抛工具的重力补偿算法

在研抛加工过程中, 力/力矩传感器的测量值 F_a 包括以下三项: 研抛作用力 F 、研抛工具和连接件本身的重力 F_g 以及进给移动过程中机器人关节产生的惯性力 F_i 。其受力分析如图 2 所示, F_a 的大小为: $F_a = F + F_g + F_i$ 。由于在加工过程中机器人加速度较小, 运动很平稳, 路径轨迹连续, 步长也很小, 所以相对于研抛工具和连接件的重力和研抛加工作用力而言, 惯性力非常小, 对加工影响可以忽略不计, 因此上式可简化为 $F_a = F + F_g$ 。

当机器人进行曲面研抛加工时, 随着工件表面形状的变化, 机器人的位姿也会作相应的变化, 导致力传感器坐标系的姿态变化, 因此研抛工具和连接

件的重力在力传感器坐标系上的分量也随之发生变化。为了使整个加工过程保持在一个相对平稳的研抛力范围内, 必须消除研抛工具和连接件重力对加工造成的干扰, 也就是需要对研抛工具和连接件的重力进行补偿。

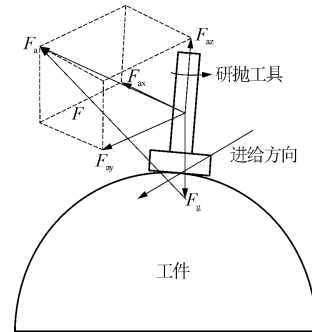


图2 加工过程中力分析图

将抛光工具调整到不与工件接触的位置, 此时研抛力 $F = 0$ 。不管机器人处在何种姿态下, 研抛工具和连接件的重力方向都是竖直向下的, 与机器人基坐标系 B 的 Z 轴方向反向, 因此研抛工具和连接件的重力在基坐标系 B 中可表示为 ${}^B F_g = [0 \ 0 \ -G]^T$ 式中的 G 代表研抛工具和连接件的重力。

将基坐标系 B 中的重力用旋转矩阵的方法转换到力的传感器坐标系 A 下, 转换关系为 ${}^A F_g = {}^A R_B^E R^B F_g$, 式中 E 代表机器人末端坐标系, 其中 ${}^A F_g = [F_{gx} \ F_{gy} \ F_{gz}]^T$ 为要消除的重力干扰项。

在机器人初始状态下, 传感器坐标系 A 与机器人基坐标系 B 重合, 其绕 Z 轴的旋转矩阵可设为

$${}^A R_B^E = \begin{bmatrix} x_1 & -y_1 & 0 \\ y_1 & x_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

此时, ${}^A F_a = {}^A F_g$, 即为力传感器在传感器坐标系 B 下的测量值。当机器人本体标定结束后, ${}^E R_B^E$ 已知, 由公式 ${}^A F_g = {}^A R_B^E R^B F_g$ 可以建立一个二元二次方程组, 求出 ${}^A R_B^E$, 再代入公式 ${}^A F_g = {}^A R_B^E R^B F_g$, 可求出 ${}^A F_g$ 。为消除该干扰项, 在力/力矩传感器的测量值中减去 ${}^A F_g$, 即 ${}^A F = {}^A F_a - {}^A F_g$ 。

4 机器人研抛力控制策略

在机器人的加工环境中, 研抛力 F 和机器人的运动位移变化量 ΔH 的微分变化关系可表示为

$$F = k_p \Delta H + \Delta \dot{H} + M \Delta \ddot{H}$$

式中 k_p 、 B 、 M 分别为研抛工具和连接件的理想刚度项、理想阻尼项、理想惯性项, 三者均为常数矩阵, ΔH 为机器人运动位移变化量。

在加工过程中,由于加入研抛力的信息反馈,抛光工具在精细控制下速度和加速度变化很小,可以忽略阻尼项和惯性项的作用,只考虑位置项 ΔH 对研抛力的影响,因此上述公式可以简化为 $F = k_p \Delta H$ 。

根据机器人研抛力和位置的关系式,结合 ATI 传感器的性能及原理,在不改变机器人位置控制器前提下,采用基于位置内环的力外环柔顺控制策略,设计了如图 3 所示的力反馈闭环控制方案。

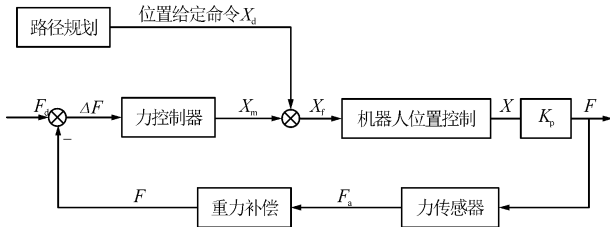


图 3 基于位置内环的力外环控制

按照加工工艺要求,设定理想的研抛力 F_d ,通过 ATI 传感器实时测量研抛工具和工件的研抛接触力 F_s ,利用重力补偿算法消除重力干扰得到研抛力 F ,与设定的理想研抛力做差,得到 ΔF 。输入到力控制器中,输出为位置修正量 X_m ,与路径规划软件产生的位置给定命令 X_d 做和,得到 X_r 作为机器人位置控制的输入量。机器人位置控制器驱动机器人调整末端研抛工具的位姿,对研抛力进行实时补偿,从而保证整个研抛过程基本处在一个相对恒定的研抛作用力范围内。

5 实验验证及结果分析

为了验证重力补偿算法的有效性,进行了重力补偿实验。在不加工状态下,不断地变换机器人在自由空间中的研抛工具姿态,采集并记录相应的六维力传感器测量值(研抛工具和连接件重力在力传感器坐标系下 X、Y、Z 坐标轴上的分量值),加入重力补偿算法进行实时补偿,用数据采集程序记录补偿以后的传感器测量值,对补偿前和补偿后的值做相应的数据处理,绘成曲线如图 4 所示。完成重力补偿后,采用基于位置内环的力外环柔顺控制策略的机器人自动研抛系统进行实验。实验材料选用 45 钢曲面工件,研抛头选用具有被动柔顺结构的弹性橡胶海绵圆盘,下底面粘贴砂纸,圆盘直径为 75mm,实验加工状态如图 5 所示。

在研抛加工过程中,砂纸粒度分别采用 $100\mu\text{m}$ 和 $30\mu\text{m}$,主轴转速为 $1000\text{r}/\text{min}$,设定研抛力为 20N 和 30N,多次加工。通过计算机存储并显示传感器

采集数据,软件界面监控研抛力值(见图 6)。

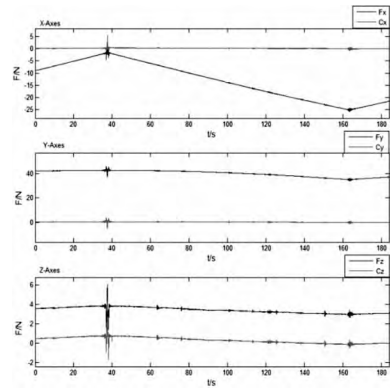


图 4 非加工状态下重力补偿数值图



图 5 金属曲面工件的加工

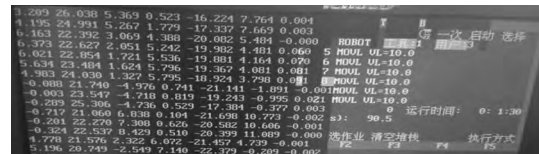


图 6 测量研抛力数值

将加工过程中采集的研抛力数据保存为 .txt 的文本格式,方便进行数据处理。观察研抛力的大小以及变化趋势,用 MATLAB 进行数据处理后做成曲线(见图 7),工件最终加工后的效果如图 8 所示。

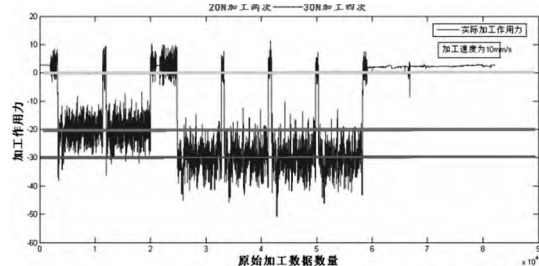


图 7 加工过程研抛力的变化

从图 6 和图 7 看出,当研抛头和工件开始接触

时,研抛力在(-10N-10N)范围内波动;稳定后,当研抛力值设定为20N时,在(10N-30N)范围内波动,当研抛力值设定为30N时,在(20N-40N)范围内波动。产生波动的原因主要是:曲面曲率变化较大和作为动力源的气动马达在转动的时候会产生一定的振动,处于合理的研抛力波动范围内。从图8可以看到工件加工质量稳定,满足加工工艺要求,良好地实现了曲面工件的研抛加工。

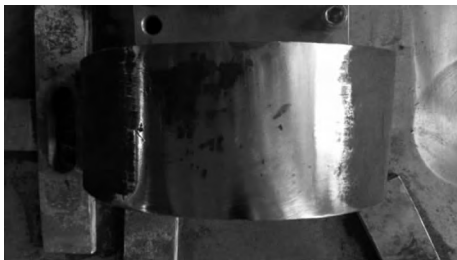


图8 加工后工件的效果

6 结语

为进行复杂曲面工件的柔顺研抛加工,自行搭建了机器人自动研抛系统平台,分析了六维力/力矩传感器和PC机在线的研抛力控制方法,提出了重力补偿算法,消除重力对研抛过程中研抛力的干扰。采用基于位置内环力的外环主动柔顺控制策略,设计了力反馈闭环控制方案。选用45钢曲面工件为

加工对象,对补偿后的系统平台进行实验验证,实验结果表明该系统是可行的,研抛力在一定范围内保持相对恒定,工件研抛后加工质量稳定,实现了基于力控制的机器人的自动研抛加工。

参考文献

- [1]李东明,李丽,马先英,等. 模具自由曲面自动研磨加工实验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2006(2): 86-88.
- [2]于清松,成晔,胡世波. 模具型面数控研磨抛光技术研究[J]. 制造技术机床, 2006(8): 44-45.
- [3]吴石林,金东燮. 模具数控研磨技术开发研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 1999, 4(2): 16-19.
- [4]詹建明,赵继,祝佩兴. 机器人超声研抛自由曲面的精加工系统[J]. 中国机械工程, 2000(8): 852-854.
- [5]李小彪,史耀耀,赵鹏兵,等. 航空发动机叶片砂带抛光力控制技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(6): 1209-1214.
- [6]魏秀权,吴林,高洪明,等. 遥控焊接工具装配力控制的重力补偿算法[J]. 焊接学报, 2009, 30(4): 109-112.

第一作者: 高强, 硕士研究生, 沈阳理工大学机械工程学院, 110159 沈阳市

First Author: Gao Qiang, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China

《现代刀具设计与应用》征订

《现代刀具设计与应用》是切削领域最新出版的一部大型技术图书,由成都工具研究所、行业协会和专业学会及标委会组织高等院校、科研院所、刀具企业和用户企业的10余名刀具专家编写,国防工业出版社出版。本书介绍了近20多年来在先进制造技术快速发展过程中切削加工工艺的发展趋势,全面反映了切削技术和刀具专业所取得的新进展。

全书600余页,大16开,130余万字,共15章,分成两篇。第一篇为刀具设计基础,共7章,介绍金属切削基本原理、刀具材料、刀具几何参数及结构设计、刀具涂层、工具系统及刀具装夹技术和刀具标准等现代刀具设计应用的基础知识;第二篇为刀具应用技术,共8章,内容涵盖了为获得最佳加工效果和正确应用刀具的系统专业知识,包括工件材料可加工性、切削数据库、切削冷却润滑等基础知识,以及高速、高效、硬切削、干式切削等切削新工艺,刀具动平衡和安全技术、加工表面完整性、铣削走刀路线及编程方法和刀具管理等切削刀具专业的新技术。内容翔实新颖,充分显示了刀具应用技术在现代切削技术中的重要性。

本书可供从事金属切削专业技术工作的工程技术人员、科研人员在开发刀具新产品、应用切削新工艺、提高加工效率、降低加工成本等实际工作实践中使用,也可作为高等或中等专业学校机制专业师生的参考书及各类切削技术和刀具培训班的教材。本书对刀具制造企业开展技术创新和提高为用户服务的能力起到积极作用,为我国装备制造业提升切削加工的技术水平具有重要的现实意义。

本书定价128元,欢迎专业工作者及专业图书资料部门订阅。需订购的单位及个人请联系工具技术杂志社发行部。

电话:028-83245073 传真:028-83242240 电子邮件:toolmagazine@163.com 网银行号:102651021208

