

有机玻璃研磨抛光机器人力控制研究

杨林, 赵吉宾, 李论, 刘雷

(中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要:以有机玻璃为研抛加工对象, 将机器人离线路径规划与在线力控制结合起来组成机器人研抛控制系统。对研抛工具在加工过程中所受作用力进行了分析, 根据柔性机构与主动柔顺控制, 建立了一种主被动柔顺控制研抛模型。通过工具重力计算, 提出了基于工具负载的重力补偿算法, 用于消除研抛加工过程中产生的重力的干扰。提出了基于阻抗内环的力外环控制策略, 实现了对研抛力的无静差跟踪。试验结果表明, 该方法通过计算期望力与实际力的误差对机器人轨迹进行修正, 实现了机器人相对恒定的力控制效果。

关键词:柔顺控制; 重力补偿; 机器人; 力控制

中图分类号: TH16; TP249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3997(2015)04-0105-03

A Study of Grinding and Polishing Robot Force Control for Plexiglass

YANG Lin, ZHAO Ji-bin, LI Lun, LIU Lei

(Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Liaoning Shenyang 110016, China)

Abstract: Taking plexiglass as the grinding and polishing object, a robot grinding and polishing system is established, which is composed of robot offline path planning and online force control. An active and passive compliance control grinding and polishing model is set up by analyzing the grinding and polishing tool force in process of machining according to flexible mechanism and active compliance control. The gravity compensation algorithm based tool load is proposed by tool gravity calculation, which is for eliminating gravitational disturbance in the grinding and polishing process. A novel explicit force control strategy based on impedance inner loop control is proposed, and the tracking with no static errors about the grinding and polishing force is implemented. The experimental results show that the robot achieves a relatively constant force control effect by modifying the robot trajectory through calculating the difference between reference force and actual force.

Key Words: Compliant Control; Gravity Compensation; Robot; Force Control

1 引言

随着制造业的不断发展, 基于工件表面的研磨抛光技术被广泛应用到机械、电子、汽车、航空航天等许多行业。传统的手工研磨抛光存在研磨抛光质量不稳定、效率低, 工作环境恶劣等缺点, 而且要求操作人员具有较高的技能。难以实现低成本、高质量、短周期的现代化生产要求。因此工件表面自动化研磨抛光技术的研究引起许多国家大学、研究机构、公司的广泛关注^[1-2]。

由工业机器人和力传感器组成的研磨抛光机器人系统能够实现工件表面的自动化研磨抛光, 为替代人工研磨抛光提供了有效的解决方案。通过研究自动研磨抛光机器人系统若干关键技术问题, 初步实现了一个有机玻璃研磨抛光机器人系统。

2 研磨抛光机器人系统的组成

研抛机器人系统组成, 如图1所示。主要由六自由度 KUKA KR30-3 串联机器人, 控制柜, 工作台, 工件, 研抛工具, 上位机, 六维力传感器等组成。

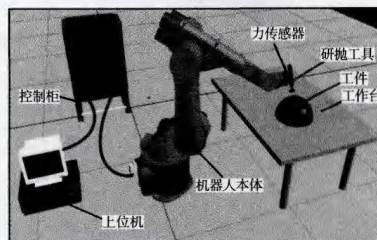


图1 研抛机器人系统

Fig.1 Robot Grinding and Polishing System

ATI 六维力-力矩传感器安装于机器人末端法兰与研抛工具之间, 可以测量力传感器坐标系下 x, y, z 三个方向的力与力矩。上位机通过以太网分别与机器人控制柜、六维力传感器相连。用来实现机器人离线路径规划与在线研抛力控制加工功能。研抛工具末端采用柔顺海绵结构, 用来吸收外部环境变化所产生的作用力。整个研抛加工主要分为两个部分: (1) 根据工件 CAD 模型, 在上位机生成离线路径规划文件, 导入机器人, 使机器人能够按

来稿日期: 2014-10-30

作者简介: 杨林, (1986-), 男, 河北人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向: 机器人学、智能控制

照理想模型文件对工件进行加工。(2)在机器人研抛加工过程中,通过以太网建立上位机与机器人、力传感器的通信连接,力传感器实时采集加工过程中所受到的作用力,将采集信息传输给上位机,上位机计算研抛作用力大小,将位姿控制信息传输到机器人,实现对研抛作用力的实时补偿功能,从而使整个研抛加工过程保持在一个相对恒定作用力范围之内。

3 主被动柔顺控制策略

3.1 主被动柔顺结构

研抛系统对接触环境顺应能力被称为柔顺性。为避免刚性接触,使机器人与环境接触时,对外部作用力产生一定的自然顺从能力,在研抛头末端设计了柔性海绵作为被动柔顺机构。在研抛加工过程中,利用力传感器采集的信息采用一定的控制策略,使整个研抛作用力保持在一个相对稳定的范围之内,作为主动柔顺控制机构^[9]。

3.2 研抛受力分析

工件受力分析,如图 2 所示。在研抛加工过程中,工件表面受到的力 $F(i)=[F_x(i)F_y(i)F_z(i)]^T$ 由研抛工具头对工件表面加工点的法向压力 $F_n(i)=[F_n(i)F_y(i)F_z(i)]^T$ 以及沿切线方向的滑动摩擦力 $f(i)=[f_x(i)f_y(i)f_z(i)]^T$ 组成。其中研抛加工过程中滑动摩擦力 $f(i)$ 由库仑摩擦力 $f_c(i)$ 和粘性摩擦力 $f_v(i)$ 组成即:

$$f(i)=f_c(i)+f_v(i)$$

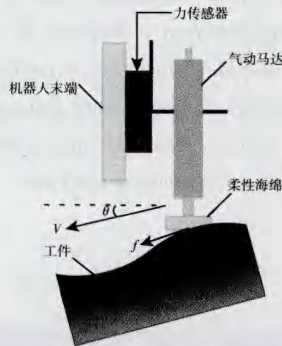


图2 工件受力分析

Fig.2 Force Analysis of the Workpiece

其中库仑摩擦力:

$$f_c(i)=\begin{bmatrix} \mu_x & 0 & 0 \\ 0 & \mu_y & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x(i) \\ V_y(i) \\ V_z(i) \end{bmatrix} \times \frac{\|F_t(i)\|}{\|V(i)\|}$$

粘性摩擦力:

$$f_v(i)=\begin{bmatrix} \rho_x & 0 & 0 \\ 0 & \rho_y & 0 \\ 0 & 0 & \rho_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x(i) \\ V_y(i) \\ V_z(i) \end{bmatrix}$$

式中: $[\mu_x \mu_y \mu_z]^T$ 和 $[\rho_x \rho_y \rho_z]^T$ —库仑摩擦系数与粘性摩擦系数;

$V(i)$ —在 i 时刻研抛加工速度。

4 研抛工具的重力补偿

力传感器装在机器人末端与研抛工具之间,其主要作用是用来检测研抛加工过程中,工件所受研抛力的大小。而力传感器

的实际测量的力作用值 F_s 主要由研抛作用力 F 、研抛工具重力 F_G 以及惯性力 F_I 三部分组成。

即:

$$F_s=F+F_G+F_I$$

考虑到研抛加工过程中,研抛路径连续,步长较小,速度平稳,研抛工具的加速度很小,整个研抛工具在加工过程中的惯性力远远小于研抛工具重力及研抛作用力,可以将惯性力 F_I 忽略不计。当机器人处于加工状态时,机器人末端姿态会随着工件表面形状而发生变化,从而导致力传感器坐标系的姿态发生变化,使研抛工具重力 F_G 在力传感器坐标系上的分量发生变化。要保证整个加工过程中研抛作用力保持在一个相对平稳恒定的范围内就要消除研抛工具重力在整个加工过程中所产生的干扰,因此必须对研抛工具重力进行补偿^[4-7]。

在机器人研抛控制系统中涉及到三个坐标系,如图 3 所示。机器人基坐标系(BASE)、机器人末端坐标系(END)、力传感器坐标系 (SENSOR)。研抛工具重力在基坐标系中的表达式为 ${}^B F_G=[0 \ 0 \ -G]$,式中: G —工件的重力。而末端力传感器为最直接感受到负载重力作用力的部件,其表达式为: ${}^S F_G=[F_{GX} \ F_{GY} \ F_{GZ}]$ 。他们之间的转换关系为: ${}^B F_G={}_B^S R \cdot {}^S F_G={}_S^B R \cdot {}^S F_G$ 。式中: ${}_B^S R$ 、 ${}_S^B R$ —旋转矩阵, ${}_B^S R$ 旋转矩阵由机器人本体可以确定, ${}_S^B R$ 矩阵的标定由力传感器与机器人的末端安装方式来确定。在研抛加工过程中,我们通过将力传感器测量的数值转换到基础坐标系,消除重力对研抛加工的干扰就可以得到实际加工的研抛作用力 $F={}_B^S F_s-{}_B^B F_G$ 。式中: ${}_B^S F_s$ —力传感器测量值在基坐标系下的数值。

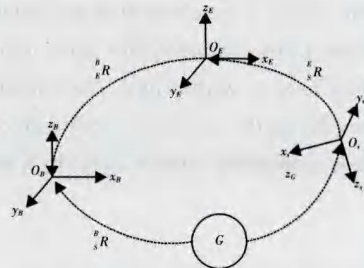


图3 重力在不同坐标系下转换计算

Fig.3 Tool Gravity Calculation Based on Coordinate System Transformation

5 机器人研抛力控制方案

实现的主被动结构机器人力控制方案为基于阻抗内环的力外环控制策略^[3]。它是根据机器人末端的位置与研抛力之间的关系,通过调整位置误差来达到控制研抛作用力的目的。

在机器人主被动柔顺控制中,采用二阶线性阻抗控制器建立研抛作用力与笛卡尔坐标系位置之间的关系:

$$F=K_p \Delta X+K_s \Delta X'+K_t \Delta X''$$

式中: $\Delta X=X-X_d$, K_p , K_s 和 K_t —研抛工具的理想刚度、理想阻尼和理想惯量; X , X_d —实际位置和参考位置。

在研抛加工过程中,机器人的运动进给速度较慢,速度变化较小,研抛工具质量不大,可以忽略阻尼项和惯性项的作用,即可以认为速度项 $\Delta X'$ 和加速度项 $\Delta X''$ 很小,忽略其对研抛作用力 F 的影响,即:

$$F=K_p \Delta X$$

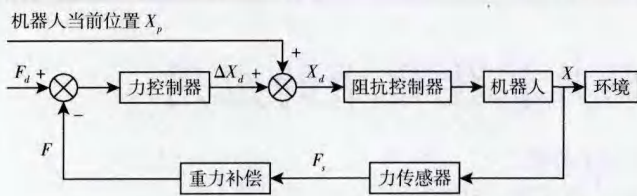


图4 基于阻抗的力外环控制

Fig.4 Force Control Based on Impedance Inner Control

根据工件曲面材质特性,按照工艺要求给定研抛力 F_d ,在主被动柔顺控制系统中,通过力传感器跟踪反馈作用力 F_s ,补偿由于研抛工具导致的重力干扰,得到当前研抛作用力 F ,与给定力 F_d 比较,通过力控制器得到位置修正量 ΔX_d ,阻抗控制器执行修正后的位置命令 X_d ,从而实现基于主被动柔顺结构的阻抗内环力外环研抛力控制。

6 试验及结果分析

为了消除研抛加工过程中负载工具重力对研抛作用力产生的影响,对负载重力进行了补偿。机器人在不同姿态状态下,研抛工具负载重力在传感器坐标系 x, y, z 三个方向的分量,以及经过重力补偿后负载重力在三个方向的分量,如图5所示。

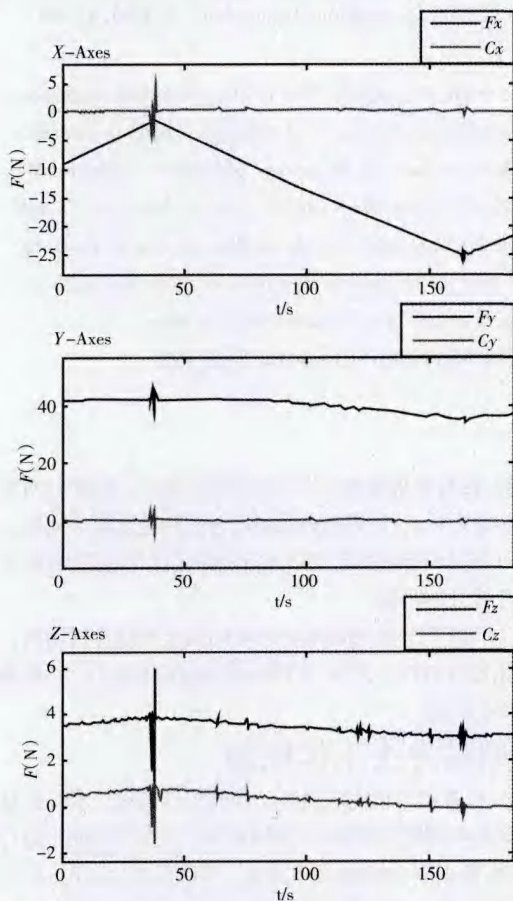


图5 工具负载重力补偿

Fig.5 Tool Load Gravity Compensation

在消除工具负载重力的前提下,根据机器人研磨抛光工具的主被动柔顺控制结构,应用力控制方案对有机玻璃进行了研抛加工力控制试验^[8-10]。试验如图6所示。

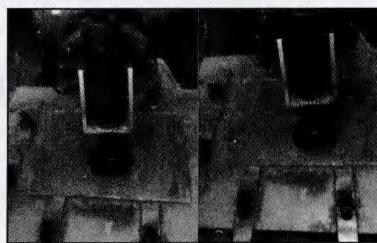


图6 有机玻璃研抛加工

Fig.6 Plexiglass in Grinding and Polishing

在研抛试验中,考虑到有机玻璃的材质较软,采用(3~5)N的研抛压力,马达主轴转速为(1000~1500)r/min,砂纸型号分别为100 μ m、30 μ m、15 μ m、9 μ m。试验过程中,加入力控制加工,控制压力为3N,主轴转速为1000r/min。力控制效果,如图7所示。

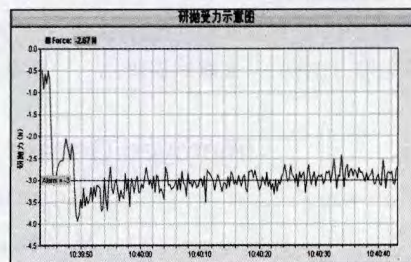


图7 研抛受力示意图

Fig.7 Grinding and Polishing Force

从研抛工具与工件表面开始接触时为起点,在(0~10)s内,工件表面所受的力在(-2~4)N范围内波动,10s之后,工件所受研抛力维持在(-2.5~3.5)N范围内波动,大部分的研抛力出现在(-2.75~3.25)N范围内,即维持在0.5N的范围之内。研抛力波动主要由以下两个因素影响:(1)研抛工具内带有气动马达,气动带动研抛头转动,同时研抛头的转动也会使研抛头本身存在一定振动,这是造成研抛力波动的主要原因。(2)研抛工具与工件之间存在相对加工运动,工件表面存在形变,力控制器通过检测接触力的变化,调整研抛工具的位置,从而造成研抛力发生小范围的波动。

7 结论

我们在研抛工具末端加入被动柔顺装置,并对研抛工具在加工过程中所受到的作用力进行分析。消除了末端工具重力在力传感器采集研抛作用力时所产生的干扰。采用基于阻抗内环力外环的控制策略对有机玻璃进行研抛试验,试验结果表明,该控制策略将研抛作用力控制在相对稳定的作用范围,满足有机玻璃对稳定研抛作用力的加工要求。

参考文献

- [1] 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.
(Tan Fu-sheng, Ge Jing-guo. Research on force-control-based robotic machining and its package implementation [J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2008.)
- [2] 张庆伟.基于打磨机器人的力/位混合控制策略研究[J].化工自动化及仪表,2012.
(Zhang Qing-wei. Research of the hybrid force/position control strategy for grinding robot [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2012.)
- [3] 蒋再男.基于阻抗内环的新型力外环控制策略[J].航空学报,2009.
(Jiang Zai-nan. Novel explicit force control strategy based on impedance inner control [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009.)

(下转第111页)

传统交叉算子的贴装顺序依次是:

21→7→19→17→21→20→16→18→21→1→8→12→
21→10→6→2→21→11→2→14→21→3→4→15→21→5→9

该贴装路径长度为 1313.8mm。

改进交叉算子的贴装顺序依次是:

21→2→18→13→21→11→6→10→21→3→7→17→21→
15→14→5→21→20→8→9→21→19→12→4→21→1→16 该贴
装路径长度为 1132.9mm。

改进算法的路径优化渐变线图,如图 5 所示。从图 5 中可以看到运用改进遗传算法,在初代种群中的贴装路径值接近 1400mm,经过 100 代的优化后,贴装结果快速收敛,最优解已经降到 1175mm 附近,在 100 代至 400 代个体的优化进程中,由于采用单点的基因位对称变异算子,实现了种群从局部最优解向全局最优解的过度,该过程分别发生在第 180 代和第 340 代附近。当遗传到 400 代时,满足结束条件,跳出循环。

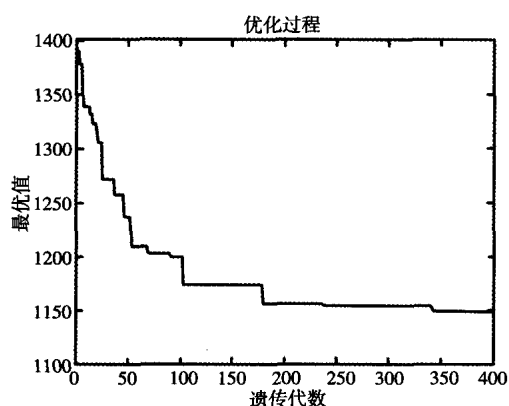


图 5 改进算法的路径优化渐变线

Fig.5 The Path of the Improved Algorithm to Optimize the Gradient Line

6 结束语

对专用 LED 贴片机的运动机构和贴装过程进行分析。以贴片头的移动距离作为优化目标函数,建立优化数学模型。利用改进的算法求解优化问题,进行了 MATLAB 仿真。得到以下结论:
(1)应用改进交叉算子的遗传算法的得到的贴装路径优化结果远

优于应用传统遗传算法的得到的优化路径;(2)通过两点交叉剔除重叠交叉算子的多点基因互换,加速了产生局部最优解的收敛速度,单点的基因位对称变异算子的应用,实现了种群从局部最优解向全局最优解的过度。避免未熟收敛,加快收敛速度。

参考文献

- [1] DUMANE, ORIT. The quadratic assignment problem in the context of the printed circuit board assembly process [J]. Computer and Operations Research, 2007, 34(1): 163-179.
- [2] ONGNS, KHOOLP. Sequence placement planning for high-speed PCB assembly machine [J]. Integrated Manufacturing Systems, 2002, 13(1): 35-46.
- [3] 杜轩, 李宗斌, 贾晓晨. 基于遗传算法的复合式贴片机贴装过程优化 [J]. 西安交通大学学报, 2009(5): 86-90.
(Du Xuan, Li Zong-bin, Jia Xiao-chen. Composite patch machine SMT process based on genetic algorithm optimization [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009(5): 86-90.)
- [4] 曾成, 赵锡钧, 徐欣. 贴片机的装配工艺的优化研究 [J]. 现代制造工程, 2007, 10(3): 38-40.
(Zeng Chen, Zhao Xi-jun, Xu Xin. Placement machine assembly process optimization [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2007, 10(3): 38-40.)
- [5] 曾又姣, 金烨. 基于遗传算法的贴片机贴装顺序优化 [J]. 计算机集成制造系统, 2004(2): 86-89.
(Zeng You-jiao, Jin Ye. Placement machine loading sequence optimization based on genetic algorithm [J]. Journal of Computer Integrated Manufacturing System, 2004(2): 86-89.)
- [6] 曾又姣, 严隽琪. 贴片机的贴装印刷电路板中供料器的分配问题 [J]. 上海交通大学学报, 2003(11): 79-82.
(Zeng You-jiao, Yan Juan-qi. Printed circuit board SMT machine pasted on the feeder assignment problem in [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003(11): 79-82.)
- [7] 王凌. 智能优化算法及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
(Wan Ling. Intelligent Optimization Algorithm and Its Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.)
- [8] Lee S H, Hong J M. An effective algorithm for a surface mounting machine in printed circuit board assembly [J]. IEEE, 1997: 932-937.
- [9] Xu Y L, Lin M H. A GA-ACO-Local search hybrid algorithm for solving quadratic assignment problem [C]. The Genetic and Evolutionary Computation Confi. Washington, 2006: 599-605.
- [10] Ho W, Ji P. A hybrid genetic algorithm for component sequencing and feeder arrangement [J]. Intelligent Manufacturing, 2004, 26(11/12): 307-315.

(上接第 107 页)

- [4] 李海超. 焊接遥操作机器人系统与人机协作控制策略的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
(Li Hai-chao. Research on welding telerobotic system and human-machine cooperation control strategies [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.)
- [5] 刘立君. 遥控焊接力觉遥示教技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
(Liu Li-jun. Tele-teaching based on force sensing in remote welding [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.)
- [6] 徐志刚, 王昊, 王军义, 等. 空间机器人悬挂系统重力补偿研究 [J]. 机械设计与制造, 2014(10): 149-152.
(Xu Zhi-gang, Wang Hao, Wang Jun-yi, et al. The research of space robot suspension system gravity compensation [J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(10): 149-152.)
- [7] 熊有伦. 机器人技术基础 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1995.

- (Xiong You-lun. Fundamentals of Robot Techniques [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology press, 1995.)
- [8] 刘广保, 赵吉宾, 陈白宁, 等. 有机玻璃的机器人自动化研抛工艺研究 [J]. 机械设计与制造, 2014(5): 151-154.
(Liu Guang-bao, Zhao Ji-bin, Chen Bai-ning, et al. A Study of Robotic Automation Grinding and Polishing Process for Polymethylmethacrylate [J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(5): 151-154.)
- [9] 郭彤颖, 曲道奎, 徐方. 机器人研磨抛光工艺研究 [J]. 新技术新工艺, 2006.
(Guo Tong-ying, Qu Dao-kui, Xu Fang. Research on robot grinding and polishing processing technology [J]. New Technology & New Process, 2006.)
- [10] 王瑞芳, 徐方. 机器人研磨抛光工艺研究与实现 [J]. 新技术新工艺, 2008.
(Wang Rui-fang, Xu Fang. Research and realization of robot grinding and polishing processing technology [J]. New Technology & New Process, 2008.)