

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2021.06.045

基于阻抗控制的工业机器人力控制方法

毕如奇

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:针对工业机器人的力控制问题,提出一种通过机器人运动轨迹补偿来间接控制接触力的阻抗控制算法。通过分析机器人末端与加工对象的接触模型设计控制系统。借助力传感器采集的力信号,将阻抗控制表达式进行离散化处理,由此计算轨迹修正值的表达式。对机器人运动轨迹补偿进行仿真,验证方法的可行性。通过进行机器人磨削试验,对比有力控和无力控的接触力波形图,验证了方法的有效性。

关键词:工业机器人;力控制;阻抗控制;力传感器

中图分类号:TP242.2 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)06-0178-03

Force Control Method of Industrial Robot Based on Impedance Control

BI Ruqi

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: As to the force control of industrial robots, an impedance control algorithm that indirectly controls contact force through the motion trajectory compensation is proposed. The control system is designed by analyzing the contact model between the robot end and the processing object. With the help of the force signal collected by the force sensor, the impedance control expression is discretized and the expression of trajectory correction value is calculated. The robot motion trajectory compensation is simulated to verify the feasibility of the method. The effectiveness of the method is verified by comparing the force-controlled and non-force-controlled contact force waveforms through the robot grinding test.

Keywords: industrial robot; force control; impedance control; force sensor

0 引言

当工业机器人用于磨削、装配和去毛刺等接触性作业时,机器人末端与作业对象表面之间的接触力常常难以得到有效控制,轻则损伤工件表面,重则影响加工效果,因此需要同时对力和位置进行柔顺控制。柔顺控制是指机器人通过对环境的顺从来完成某个预定的与环境有接触的任务,分为被动柔顺控制和主动柔顺控制^[1]。被动柔顺控制通过机器人自身的一些缓冲机构,如阻尼、弹簧等,来实现机器人对环境的顺应控制。但这种方法缺少针对复杂环境的适应能力,并且力控准确度低。因此,主动柔顺控制应运而生,可填补被动柔顺控制的短板,成为当前的主流研究方向。

主动柔顺控制着眼于力和位置的关系,产生了力/位混合控制^[2]和阻抗控制^[3]两大基础控制理论。力/位混合控制策略将力与位置分开控制,理论明确,但实现工业应用有较大难度。阻抗控制策略则将机器人和环境间的作用力与位置偏差看作一个动态系统,建立两者之间的关系模型,通过控制机器人末端位移,间接控制末端作用力,使得接触力跟踪期望接触力。基于两种经典力控策略,国

内外学者对工业机器人加工过程中的力控需求做了大量研究,提出了不少改进方案。DOMROES F^[4]等人基于机器人力控制和速度控制两种策略,设计了一种机器人磨削加工系统,用于小批量磨削和去毛刺的生产。ERICKSON D^[5]使用信号处理方法,设计间接自适应控制器、模型参考自适应控制器和递归最小二乘估计技术,确定在三自由度机器人运动约束期间环境的刚度和阻尼,对阻抗参数的识别具有重要的意义。高培阳^[6]对工业机器人恒力磨抛系统进行了设计和研究,设计了力跟踪控制器和姿态顺应控制器,通过仿真和实物实验,验证了力控制方法的有效性,并且提高了磨抛效率。

RobotStudio 是 ABB 机器人的计算机仿真软件,可以用来模拟加工过程。RobotStudio 中有一种称为路径偏移(Path Offset)的编程功能,目的是根据传感器的输入对原有机器人路径进行在线调整。因此,将接触力信号作为输入,由阻抗控制器进行处理,得到轨迹修正值,利用轨迹修正值作为路径偏移功能的输入,就能实时控制机器人的加工轨迹。本文借助力传感器,利用该功能提出了一种运动轨迹补偿间接控制接触力的阻抗控制算法,从而实现机器人加工时的力控制。

基金项目:南京航空航天大学校级科研项目(1005-YQR17021)

作者简介:毕如奇(1996—),男,安徽淮南人,硕士研究生,研究方向为智能机器人技术。

1 系统建模

1.1 机器人与加工对象的接触模型

图 1 所示为机器人与加工对象的接触模型,将加工对象看作为环境。当机器人末端执行器与环境接触时,在任意坐标轴方向上的动力学模型可以简化为质量阻尼弹簧系统。 x_e 是变形前的环境位置; x 为变形后环境的位置,并表征机器人的实际轨迹; x_d 是机器人运动的期望轨迹; m_d 、 b_d 、 k_d 分别是机器人期望阻抗模型中的惯性系数、阻尼系数和刚度系数; k_e 是环境刚度系数; f_c 是接触力。根据胡克定律,简单的环境动力学模型为

$$f_c = k_e(x - x_e) \quad (1)$$

根据式(1)可知,当环境刚度与位置不变时,改变机器人的实际轨迹即可改变接触力。

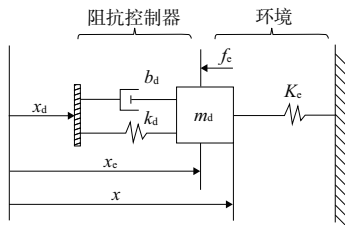


图 1 机器人与环境的接触模型

1.2 阻抗控制策略

常用的理想阻抗控制模型表达式^[3]为

$$M_d(\ddot{X} - \ddot{X}_d) + B_d(\dot{X} - \dot{X}_d) + K_d(X - X_d) = -F_c \quad (2)$$

式中: M_d 、 B_d 、 K_d 分别是所需阻抗模型的 n 维惯性矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; \ddot{X} 、 \dot{X} 、 X 分别是机器人末端执行器的 n 维实际加速度向量、速度向量和位移向量; \ddot{X}_d 、 \dot{X}_d 、 X_d 分别是期望加速度向量、速度向量和位移向量; F_c 是机器人末端执行器接触环境时所受的 n 维接触力向量。

考虑单一方向上的阻抗控制,式(2)可进一步表示为

$$m_d \ddot{e} + b_d \dot{e} + k_d e = -f_c \quad (3)$$

其中: \ddot{e} 、 \dot{e} 、 e 分别是机器人末端执行器的加速度修正值、速度修正值和位移修正值; f_c 是机器人末端执行器接触环境时所受的力。

2 控制系统设计

2.1 控制系统图

图 2 所示为机器人加工时的接触力控制系统图。首先,设定参考轨迹 X_r ,通过计算得到轨迹修正量 e 。将二者求和,得到期望轨迹,表示为 X_d 。期望轨迹 X_d 经过机器人控制器运算,控制机器人运动,得到实际轨迹 X 。将实际轨迹 X 与环境位置 X_e 求差,得到环境变形量 ΔX_e ,再乘以环境刚度 K_e 得到接触力 F_c ,输入阻抗控制器计算得到轨迹修正值 e ,最终实现了整个过程的闭环控制。

2.2 控制算法

由于采集到的力信号是离散的,将阻抗控制策略的微

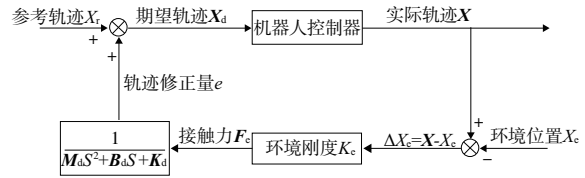


图 2 机器人接触力控制系统图

分形式转化为差分形式,求出轨迹修正值的表达式。算法流程如图 3 所示。

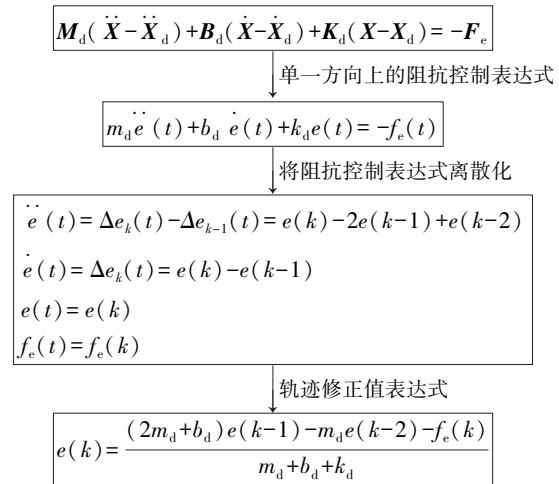


图 3 阻抗控制策略离散化方法

根据图 3 所示的流程,将阻抗控制表达式进行单一方向上的离散化之后,可得到轨迹修正值与接触力在离散域的表示,进而得到轨迹修正值的表达式。其中, m_d 、 b_d 、 k_d 为设定好的机器人阻抗模型参数,只须知道前两个时刻轨迹修正值和此时的接触力,就能计算出此时的轨迹修正值。

2.3 控制系统流程

根据前文建立的模型和算法,整个机器人系统的控制流程如图 4 所示。力传感器实时采集力信号,通过阻抗控制器中的算法计算得到轨迹修正值,然后将轨迹修正值传送给机器人控制器。机器人控制器将初始加工轨迹和轨迹修正值求和,通过运动学变换得到实际加工轨迹。最后,机器人本体根据机器人控制器发出的指令进行运动轨迹补偿。整个加工过程中,系统保持实时监测,实时修正。

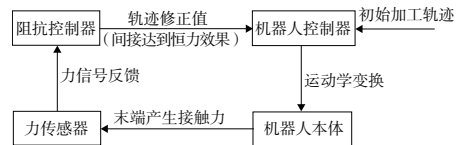


图 4 控制系统流程

3 机器人运动轨迹补偿仿真

以机器人对物体边缘进行倒角为例,其加工过程仿真如下。

首先,在 RobotStudio 中通过离线编程模拟出期望轨

迹,然后通过路径偏移功能对轨迹进行处理。传感器在路径偏移功能中的输入值可以通过生成一系列随机数来代替。如图5所示,蓝色轨迹(线1)是模拟过程中的实际轨迹,而期望轨迹是物体的边缘,假定为一条直线。可见实际轨迹与期望轨迹存在偏差,机器人端部始终在进行z方向上的轨迹修正,接触力大则减少进给量,接触力小则增

加进给量。在实际加工过程中,可以理解为被加工物体的轮廓表面质量参差不齐。为了实现机器人末端执行器与加工表面的恒力控制,采用运动轨迹补偿的方法保证接触力的较小波动。仿真结果如图5所示(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。

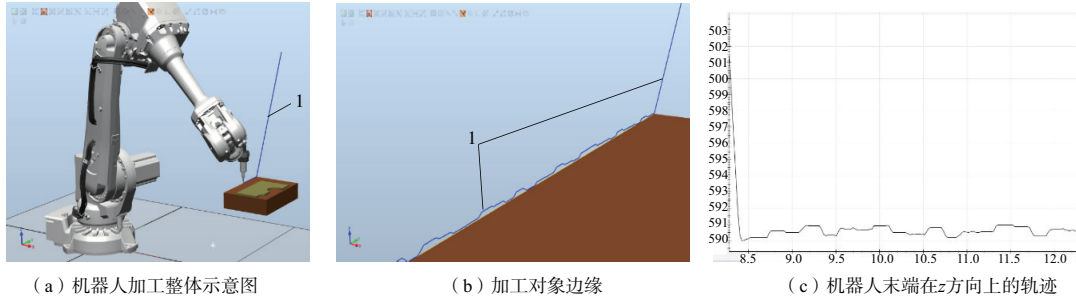


图5 机器人路径偏移仿真

由图5可知,机器人可通过外部传感器的输入来实时调整自身运动轨迹,由此验证了通过机器人运动轨迹补偿来间接控制接触力方法的可行性。

4 机器人主动力控制试验

为验证控制算法有效可行,进行机器人恒力磨削试验,加工对象为钛合金平面工件。ABB 机器人提供的 PC SDK 允许系统集成商、第三方或个人用户为控制器添加自定义的应用程序^[7]。为实现控制功能,基于此开发了机器人磨削力控上位机软件。该软件可采集力传感器信号,经过内置的阻抗控制算法进行处理,处理数据被实时传递给机器人控制器,从而控制机器人运动轨迹的补偿量,实现间接的力控制。在机器人磨削过程中,通过算法设定工件表面法向接触力为-40 N,实验结果如图6、图7所示。

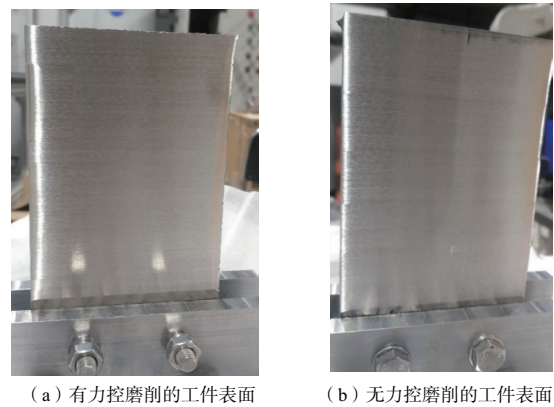
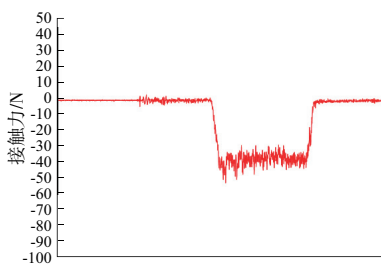
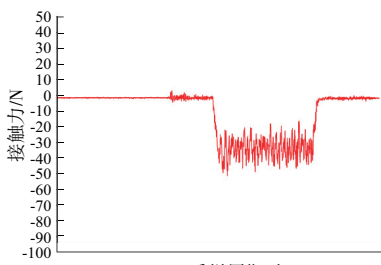


图7 有力控磨削和无力控磨削的工件表面



(a) 有力控磨削的力波形图



(b) 无力控磨削的力波形图

图6 有力控和无力控的接触力波形图

由图6的机器人磨削时的法向接触力波形图可看出:加入阻抗控制算法进行磨削的接触力波形波动范围约为-30 N~-50 N,无力控的接触力波形波动范围约为-20 N~-50 N。前者波动幅度较小,说明接触力得到了良好的控制。图7为磨削后的工件对比图,经过表面粗糙度仪的测量,有力控磨削后的工件表面粗糙度约为0.3 μm,无力控磨削后的工件表面粗糙度约为0.5 μm,可见有力控磨削的工件表面更为光滑,磨削质量较高。综上,通过力波形图以及磨削后工件表面质量的对比,验证了通过机器人运动轨迹补偿来间接控制接触力的有效性。

5 结语

本文提出了一种利用工业机器人运动轨迹补偿来间接控制接触力的阻抗控制算法,并以实际机器人磨削试验进行了验证。结果表明,该算法具有控制接触力恒定的效果,相比无力控磨削,有力控的波形震荡更小,即验证了该算法的有效性。相比传统的被动柔顺控制,主动柔顺控制具有更强的适应性,可根据加工对象的特点进行控制算法的编写。同时,主动柔顺控制也可与神经网络等智能控制方法相结合,在将来有着更广阔的应用前景。

(下转第198页)

而实际生产中要求的检测精度为 0.05 mm,检测速率为 500 ms/件,故精度和速率符合实际生产要求。

5 结语

本文针对手机装配线中屏幕玻璃和听筒丝网的装配以及实现装配的自动化和智能化,提出了手机玻璃丝网装配在线视觉检测方案。完成了视觉测量系统的设备选型以及光源成像方案,并设计了手机玻璃丝网的视觉检测流程,研究并讨论了图像预处理方案、边缘提取方法以及尺寸测量的模型与方法,提出了一种应用于屏幕玻璃和听筒丝网装配的在线测量方法。最后将该在线视觉检测方法应用于玻璃丝网在线视觉测量系统的实验平台,针对测量得出的装配弥补参数以及测量速率进行了实验和分析。由实验结果可得出,其综合检测误差和检测速率均满足实际生产线上检测的精度和实时性要求。

(上接第 180 页)

参考文献:

- [1] 朱阳光. 基于力信息的机器人主动柔顺装配研究[D]. 南京:南京理工大学,2002.
- [2] RAIBERT M H, CRAIG J J. Hybrid position/force control of manipulators [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1981, 103(2): 126-133.
- [3] HOGAN N. Impedance control: an approach to manipulation: part II—implementation [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1985, 107(1): 8-16.
- [4] DOMROES F, KREWET C, KUHNENKOTTER B. Application and analysis of force control strategies to deburring and

参考文献:

- [1] 焦亮. 基于机器视觉的精密零件高精度测量与自动化装配系统的软件及实验研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.
- [2] 刘超. 基于机器视觉的微小型零件自动测量与装配[D]. 大连:大连理工大学,2009.
- [3] 冯错. 基于机器视觉的金属手机外壳尺寸测量与表面典型缺陷检测研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.
- [4] 王盼. 手机电池的尺寸测量和外观缺陷检测[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [5] 刘杰. 基于机器视觉的手机二维尺寸测量技术研究[D]. 广州:广东工业大学,2017.
- [6] 吴海波. 基于视觉的装配机器人轴孔识别与定位技术研究[D]. 焦作:河南理工大学,2018.

收稿日期:2020-11-03

grinding[J]. Modern Mechanical Engineering, 2013, 3(2): 11-18.

- [5] ERICKSON D, WEBER M, SHARF I. Contact stiffness and damping estimation for robotic systems [J]. The International Journal of Robotics Research, 2003, 22(1): 41-57.
- [6] 高培阳. 基于力传感器的工业机器人恒力磨抛系统研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
- [7] 孙恺廷,朱隽垚,于存贵,等. 工业机器人三维虚拟监控系统的设计与实现[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(5): 154-156, 210.

收稿日期:2020-10-29

(上接第 194 页)

合手眼标定感知 y 轴和 z 坐标。基于 PLC 和 IPC 的协同控制系统实现充电过程自动控制,PLC 与机器人控制器采用 IO 输出动作条件、查询动作结果,IPC 通过 OPC 读取动作标志位,并采用 TCP 向机器人发送动作目标位置坐标。实验和应用结果表明,充电孔感知误差不超过 0.5 mm,控制系统功能完善、可靠性好,在电动公交车运营过程中具有较强的实用性。

参考文献:

- [1] 施莹. 基于机器人的电动汽车充电系统及其自动插接的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [2] 姚安庆. 基于双目视觉的电动汽车充电孔的识别与定位系统设计[D]. 杭州:浙江工业大学,2020.
- [3] 段峥祺. 基于图像识别算法的电动汽车的自动充电接口的识别与定位及其控制方法[D]. 厦门:厦门大学,2017.
- [4] 纪柱. 电动汽车充电口识别及曝光算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [5] 马立焱. 基于超声波的电动汽车充电口定位技术[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [6] 王晓安. 电动汽车充电口位姿超声定位技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

[7] 孙成. 复杂环境下电动汽车充电口识别与定位方法研究[D]. 苏州:苏州大学,2019.

- [8] 张辉,金侠挺. 基于曲率滤波和反向 P-M 电动车充电孔检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1626-1638.
- [9] 来佳伟,何玉青,李霄鹏,等. 基于单目视觉的机械臂目标定位系统设计[J]. 光学技术, 2019, 45(1): 6-11.
- [10] 张航,王晓凯,张云鹏. 基于单应矩阵的手眼视觉系统简便标定方法[J]. 计算机工程, 2018, 44(9): 33-37.
- [11] 廖家骥,刘建群,高伟强,等. 基于机器视觉的机器人分拣系统设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(4): 25-27, 31.
- [12] 徐斌,曹润宁. 基于视觉技术改进的机器人异型件插装系统的优化研究[J]. 机械工业标准化与质量, 2017(12): 36-39, 46.
- [13] 何高清,章路平. 基于 CAN 总线的某特种机器人控制系统设计与实现[J]. 机床与液压, 2020, 48(4): 86-90.
- [14] 黄敦华,李勇,季君. 基于 OPC Server 技术的多功能工业机器人控制系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(10): 98-102.

收稿日期:2020-12-15