

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2017.0776

基于被动柔顺的机器人抛磨力/位混合控制方法

黄 婷¹, 孙立宁¹, 王振华¹, 禹鑫焱², 陈国栋¹

(1. 苏州大学机器人与微系统研究中心, 江苏 苏州 215021; 2. 浙江工业大学信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘 要: 为了实现抛磨系统机器人末端的位置控制和接触力控制, 提出一种基于被动柔顺装置的机器人抛磨系统力/位混合控制策略. 在机器人末端安装一个柔顺装置实现对工具末端力控制和位置控制的解耦. 柔顺装置一端安装于机器人末端, 另一端连接抛磨工具. 机器人控制器控制机器人末端位姿, 间接对工具末端位姿进行控制和补偿, 柔顺装置控制器直接控制工具与工件的接触力. 经过建模分析, 采用非线性 PD (比例-微分) 控制提高了柔顺装置的动态调节性能. 仿真结果证明该方法可以对目标轨迹进行跟踪与补偿, 并实现期望力的快速调节. 非线性 PD 控制将柔顺装置受干扰后恢复稳定的调节时间由 220 ms 提高到 60 ms. 实验进一步验证了仿真结果, 并对航空叶片进行打磨与抛光获得了良好的表面质量. 结果表明提出的控制方法是切实可行的.

关键词: 机器人抛磨; 被动柔顺; 力/位混合控制; 位姿补偿; 非线性 PD 控制

中图分类号: TP242.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2017)-06-0776-10

Hybrid Force/Position Control Method for Robotic Polishing Based on Passive Compliance Structure

HUANG Ting¹, SUN Lining¹, WANG Zhenhua¹, YU Xinyi², CHEN Guodong¹

(1. Robotics and Micro-systems Center, Soochow University, Suzhou 215021, China;

2. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In order to realize the position control and contact force control of the polishing robot end-point, a hybrid control strategy based on passive compliant device is proposed. By installing a compliant device at the end of the robot, the force control and position control of the tool end are decoupled. One end of the compliant device is mounted at the end of the robot and the other end is connected with the polishing tool. The robot controller is used to control the position and orientation of the robot end, so as to control and compensate the position and orientation of the tool end indirectly, while the compliant device controller is used to control the contact force between the tool and the workpiece directly. Through modeling and analysis, nonlinear PD (proportional-differential) control is adopted to improve the dynamic performance of the compliant device. The simulation results show that the method can track and compensate the target trajectory, and realize rapid adjustment of the desired force. Nonlinear PD control improves the regulating time from 220 ms to 60 ms after the compliant device is disturbed. The simulation results are further verified by experiments, and good surface quality is obtained through polishing the aviation blades. The results show that the proposed control method is feasible.

Keywords: robotic polishing; passive compliance; hybrid force/position control; position and orientation compensation; nonlinear PD (proportional-differential) control

1 引言 (Introduction)

近年来, 随着机器人技术的迅猛发展, 机器人应用的领域越来越广^[1]. 在工业上的应用主要分为 2 类. 一类是非接触作业, 例如喷涂作业和焊接作业, 此类任务仅要求机器人在工作空间中进行单纯的位置控制即可实现作业任务^[2]. 另一类是接触式作业, 如装配作业、抛磨作业及去毛刺作业等, 此

类任务除了要求位置达到所要求的精度外, 还要求对机器人与工件的接触力进行控制^[3-5]. 因为在作业过程中机器人需与工件接触, 机器人末端与工件之间接触力太大会导致对机器人和工件的损害, 太小则会导致加工工件达不到技术要求. 因此, 接触式作业机器人的控制系统采用传统的位置控制已无法满足其应用要求, 需要对机器人施加柔顺控制. 柔顺控制本质上是力和位置的混合控制, 其实现方

式有 2 种: 一种是主动柔顺, 即通过工业机器人对接触力的感知和控制, 进而实现对机器人的力/位混合控制; 另一种是被动柔顺, 即在机器人末端增加一个柔性环节, 使机器人的刚性和末端的柔性结合起来, 通过机器人实现加工的位置控制, 通过末端的柔性关节实现接触力的控制。

关于机器人的柔顺控制, 经过多年的发展, 很多研究者提出了诸多行之有效的控制方法, 比如刚度控制、阻抗控制、力/位混合控制和隐式力控制等^[6]。其中研究较多的为阻抗控制和力/位混合控制。文 [7] 考虑接触环境刚度不确定的情况, 采用带有期望力前馈的逆动力学方法, 设计控制器, 实现了机械臂力与位置的并行控制。文 [8] 针对服务机械臂操作各种未知受限运动机构的需要, 提出了一种基于运动预测和阻抗控制的控制方法, 通过阻抗控制保证机械臂与未知受限机构交互的柔性。文 [9] 提出了一种具有自适应增益的基于离散时间的滑模阻抗控制方法, 在模型不确定并存在干扰的情况下, 实现了双压电晶片微夹持器的精确力/位控制。文 [10] 提出了一种基于力/位混合控制的冗余机械臂精细控制方法, 使之在具有良好自治性和灵活性的同时保证末端的执行精度。文 [11] 提出了一种基于神经网络的鲁棒自适应力/位混合控制策略, 对于模型不确定和存在外部干扰的机械臂, 无需初步学习, 即可通过前馈神经网络去近似获得机器人动力学模型, 从而实现对末端执行器和环境之间的期望力及笛卡儿空间末端位置的稳定控制。以上文献基于不同的方法对机械臂进行主动柔顺控制, 虽然最终获得了良好的鲁棒性, 但其普遍存在控制算法复杂、实现困难等问题。相比较而言, 被动柔顺控制是由一定的机械装置在与外界环境接触时, 通过特殊的结构对相互间的作用力产生的自然顺从。其对机器人精度要求较低、力控制和位置控制分散, 比主动柔顺控制更容易实现, 并且具有更高的性价比, 因此在工业应用场合有着更广泛的应用前景。关于被动柔顺关节, 最著名的是麻省理工学院的 Whitney 带领 Draper 实验室开发的 RCC (remote center compliance), 即微偏心柔顺装置。用于装配作业, 它能对任意柔顺中心进行顺从运动^[12]。但是 RCC 装置的柔顺中心一旦确定, 就很难调整, 并且装置的刚度也是固定不可调的, 不能适应不同刚度的作业要求, 通用性较差。文 [13] 给机器人研磨和抛光系统的研抛砂带增加了柔顺机构, 在接触后能够自适应改变研磨接触力, 代替了人工研磨涡轮机叶片。文 [14] 设计了一种基于被动

柔顺结构和主动柔顺控制的柔顺机械臂, 在其关节电机和连杆之间加入串联弹性驱动器传动模块, 以应对工作环境的动态变化及人机交互的不确定性。文 [15] 设计了一种电动振动台, 配合柔顺装置进行装配, 研究了压力、振动频率和装配时间之间的关系。文 [16] 在文 [15] 平台基础上使套管在轴向方向上振动, 分析动态系统和激励参数对柔顺装配过程的影响。被动柔顺增加了系统柔性, 使得控制实现相对简单, 但同时增加了精准控制的难度, 因此在要求高精度、快速响应的应用场合一直受限。文 [17] 基于气囊抛光加工技术分析了下压深度和充气压力对接触力的影响, 采用 BP (反向传播) 神经网络 PID (比例-积分-微分) 控制策略进行抛光接触力控制, 获得了较好的加工效果。

本文在以上研究的基础上, 介绍了一种被动柔顺装置。该装置的上基座安装于机器人末端, 下基座连接抛磨工具用于抛磨加工。加工过程中下基座可被动上下调节以适应机器人和工件之间的距离。伺服阀根据控制信号对气缸内的气压进行调节, 在位移发生变化的过程中使接触力保持恒定。提出了一种基于被动柔顺的力/位混合控制策略, 将力控制和位置控制解耦, 通过被动柔顺装置控制器对末端接触力进行直接控制, 将柔顺装置的位移偏差反馈给机器人控制器进行位移跟踪与补偿, 从而对工具末端位置进行间接跟踪控制, 最终实现基于被动柔顺的机器人抛磨系统的力/位混合控制, 并获得了较好的工件表面质量。

2 被动柔顺装置建模 (Modeling of the passive compliant device)

图 1 为被动柔顺装置结构图, 主要包括: 与工业机器人末端相连接的机械接口, 相对于接口可移动的连接工具的基座, 被动柔顺的主要调整零件低摩擦气缸, 可以控制气压输出并检测气压反馈值的伺服阀以及检测装置位移变化的位移传感器。另外还包括导向装置、导向杆等元件, 用于约束该装置的空间运动自由度。控制器输出控制信号, 给伺服阀预设一个气压值, 使气缸对基座和机械接口产生一定张力。受导向装置约束, 上、下基座只能在一个自由度压缩或拉伸。当工具与工件接触产生接触力时, 上、下基座受力被压缩, 压力传感器检测气缸腔内的气压值。当气缸腔内气压超过设定值时, 伺服阀打开排气口, 通过气管向外排气以减小压力; 当气压偏小时, 伺服阀打开进气口向腔内进气增加压力; 在平衡状态下, 依靠伺服阀来维持气

缸腔内的压力不变,使得输出的接触力保持恒定。上、下基座之间的距离和机器人与工件接触点之间的法向距离有关,随着工具在工件表面移动,上、下基座之间的位移被动发生变化,位移传感器检测该位移值并将其反馈至控制器。伺服阀、气缸、压力传感器、位移传感器形成一个控制基座表面接触力的控制闭环。根据装置结构,对主要执行元件伺服阀、气缸等进行分析,综合考虑伺服阀流量方程、气缸质量流量连续性方程及系统的力平衡方程,对装置的机、电、气混合控制模型进行推导。

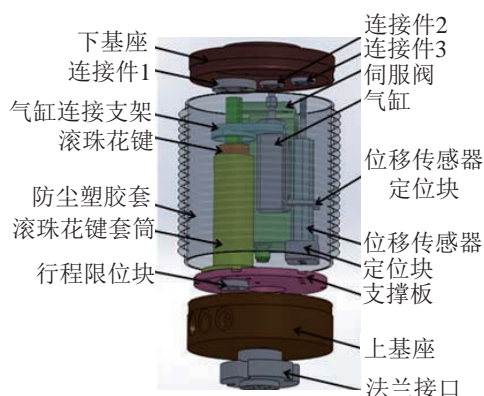


图1 被动柔顺装置结构图

Fig.1 Structure of the passive compliant device

2.1 柔顺装置流量模型

柔顺装置的气体流通原理图如图2所示。可知装置的输入信号为控制电压 u , 输出为抛磨力 F_n 。伺服阀根据输入的控制电压 u , 控制伺服阀输出气压至低摩擦气缸。比例阀和气缸之间采用气管连接, 气压作用于气缸, 产生输出力 F_n 。

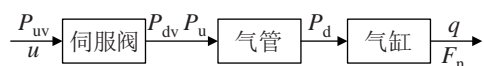


图2 被动柔顺装置气体流通原理图

Fig.2 Schematic diagram of the gas flow in the passive compliant device

伺服阀供气口阀口的流量与供气口压强、出气口压强和阀口开度有关,采用 Sanville 流量公式有:

$$q = \begin{cases} \frac{A_v P_{uv}}{\sqrt{T}} \sqrt{\frac{k}{R_c} \left(\frac{2}{k-1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, & 0 \leq \frac{P_{dv}}{P_{uv}} \leq 0.518 \\ \frac{C_f A_v P_{uv}}{\sqrt{T}} \sqrt{\frac{k}{R_c} \frac{2}{k-1} \left(\frac{P_{dv}}{P_{uv}}\right)^{1/k}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_{dv}}{P_{uv}}\right)^{(k-1)/k}}, & \frac{P_{dv}}{P_{uv}} > 0.518 \end{cases}, \quad (1)$$

式中, q 为通过阀口的流量, P_{uv} 为供气口的压强, P_{dv} 为出气口的压强, A_v 为阀口的有效面积, k 为

绝热系数, C_f 为比例阀节流口流量参数, T 为绝对温度, R_c 为理想气体常数。实际抛磨中, 无需过大的接触力, 故出气口气压较小。通常情况下, 供气口的气压为 $0.7 \text{ MPa} \sim 0.8 \text{ MPa}$, 出气口的气压可在 $0.01 \text{ MPa} \sim 0.35 \text{ MPa}$ 之间变化, 此时 $0 \leq \frac{P_{dv}}{P_{uv}} \leq 0.518$, 式(1)中第1式成立。可以看出, 当供气口压强和伺服阀内气体温度一定时, 阀口流量仅与阀口有效面积有关, 而阀口有效面积与伺服阀控制电压有关, 其影响的是出气口的压强, 因此可以认为流量公式是与控制电压 u 及阀出气口压强 P_{dv} 有关的函数。将其在零位附近线性化, 可以得到伺服阀的流量增量模型为

$$\Delta q = K_1 \Delta u + K_2 \Delta P_{dv} \quad (2)$$

伺服阀输出的气压经过一段长度为 L 的气管, 进入气缸的上腔。假设从伺服阀进入气管的气体为层流, 且气管为理想的圆形管道, 忽略伺服阀接口处与气管内的流量损失, 气管中气体流量等于伺服阀出口流量。则根据 Anderson 理论, 有

$$q = K_3 (P_u - P_d) \quad (3)$$

式中, q 为气管中的气体的质量流量, P_u 为气管进气口的压强, P_d 为气管出气口的压强, $K_3 = \frac{\rho_{av} D^2 A}{32\mu L}$ 。其中, ρ_{av} 为气体的平均密度, D 为气管的内径, μ 为气体的黏性系数, A 为气管截面积。

根据式(3)可得到气管内气体流量增量模型:

$$\Delta q = K_3 (\Delta P_u - \Delta P_d) \quad (4)$$

气体经过伺服阀和气管进入气缸。根据气体的流动特征, 假设气缸内的气体为理想气体, 满足理想气体状态方程, 气缸内的气体压力和温度是均匀一致的, 并认为气缸密闭无泄漏。根据理想气体状态方程, 有

$$P_d = \rho_d R_c T_d \quad (5)$$

式中, P_d 为气缸腔内的气体压强, ρ_d 为腔内气体密度, T_d 为腔内气体的热力学温度。

质量流量 q 应等于该腔内气体质量 m 的变化率, 结合式(5)推导可得

$$q = \frac{V_d}{R_c T_d} \left(\frac{dP_d}{dt} + \frac{P_d}{V_d} \frac{dV_d}{dt} - \frac{P_d}{T_d} \frac{dT_d}{dt} \right) \quad (6)$$

假设过程中温度 T_d 与起始温度 T_s 满足绝热过程, 则有

$$T_d = T_s \left(\frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (7)$$

对上式两边求导并代入式 (6), 忽略垂直方向的微动变化, 可以得到气缸腔内流量模型:

$$q = \frac{1}{k} \frac{V_d}{R_c T_d} \frac{dP_d}{dt} \quad (8)$$

分别将式 (2)、(4) 和 (8) 进行拉普拉斯变换, 有

$$Q(s) = K_1 U(s) + K_2 P_{dv}(s) \quad (9)$$

$$Q(s) = K_3 P_u(s) - K_3 P_d(s) \quad (10)$$

$$Q(s) = \frac{V_d}{k R_c T_d} s P_d(s) \quad (11)$$

气管进气口压强 P_u 即伺服阀出气口压强 P_{dv} , 即 $P_{dv}(s) = P_u(s)$. 联立式 (9) ~ (11), 可得

$$\frac{P_d(s)}{U(s)} = \frac{K_1}{\frac{(K_3 - K_2)V_d}{k T_d R_c K_3} s - K_2} \quad (12)$$

因此, 通过对柔顺装置各部分的流量进行建模分析, 可以推导出装置从输入的伺服阀控制电压到气缸内输出压强的关系模型, 如式 (12) 所示. 可以看出, 该部分为一个 1 阶惯性环节, 其用于表征系统响应速度的时间常数与伺服阀参数、气管密度、面积及气体的特性参数等均相关.

2.2 柔顺装置力平衡方程

腔内压强 P_d 作用于气缸, 气缸受力面积为 A_d . 对柔顺装置进行受力分析, 如图 3 所示.

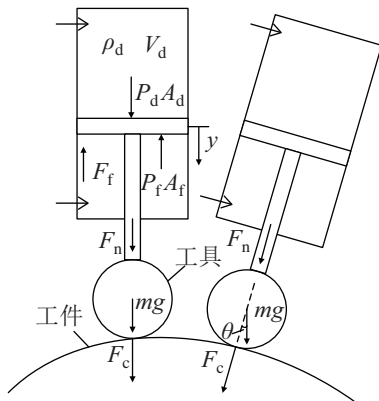


图 3 柔顺装置受力分析简图

Fig.3 Force analysis schematic of the compliant device

根据牛顿第二定律, 有

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + C_p \frac{dy}{dt} + F_n = P_d A_d - P_f A_f - F_f \quad (13)$$

式中, F_n 为柔顺装置输出抛磨力, F_f 为摩擦力, M 为气缸连接部件的总质量, C_p 为黏性阻尼系数, y 为气缸活塞运动的位移. P_f 为气缸另一腔的压强, 受力面积 A_f . 该压力主要用于抵消抛磨工具重力在工件法向方向的作用力.

由于压力传感器位于柔顺装置内部, 因此, 其测量值仅为柔顺装置施加于抛磨工具上的力 F_n , 而作用于工件的抛磨力 F_c 还需要考虑抛磨工具自身的重力, 因此有

$$F_c = F_n + mg \cos \theta \quad (14)$$

忽略低摩擦气缸的摩擦力, 综合式 (13) 和 (14), 并进行拉普拉斯变换, 有

$$M s^2 Y(s) + C_p s Y(s) + F_c(s) = P_d(s) A_d \quad (15)$$

末端工具与工件接触, 作用力 F_c , 被动产生位移 y . 等效刚度系数为 K_c , 则有

$$F_c(s) = K_c Y(s) \quad (16)$$

联立式 (15) 和 (16) 可得

$$\frac{F_c(s)}{P_d(s)} = \frac{K_c A_d}{M s^2 + C_p s + K_c} \quad (17)$$

综合式 (12)、(15) ~ (17), 装置的传递函数可以表示成图 4.

结合式 (12) 与式 (17), 系统的开环传递函数可表示为

$$G(s) = \frac{k T_d R_c K_3 K_1 K_c A_d}{[(K_3 - K_2) V_d s - k T_d R_c K_3 K_2] (M s^2 + C_p s + K_c)} \quad (18)$$

得出柔顺装置的控制量 u 与抛磨力 F_c 之间的模型, 如式 (18) 所示. 由此式可知, 该系统是一个 3 阶系统. 柔顺装置是否能够实现快速调节并达到稳定, 是由其闭环传递函数的极点和零点决定的. 如果系统的所有闭环极点都具有负实部, 则系统是稳定的. 对于一个稳定的高阶系统, 闭环极点的负实部绝对值越大, 则其相应分量衰减越迅速. 闭环零点则决定了时间响应的形状. 因此当系统开环传递函数确定后, 可以通过增加控制算法来改变系统的闭环传递函数, 从而改善系统的快速性和稳定性.

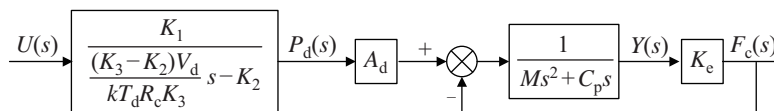


图 4 柔顺装置开环系统传递函数框图

Fig.4 Open-loop system transfer function of the compliant device

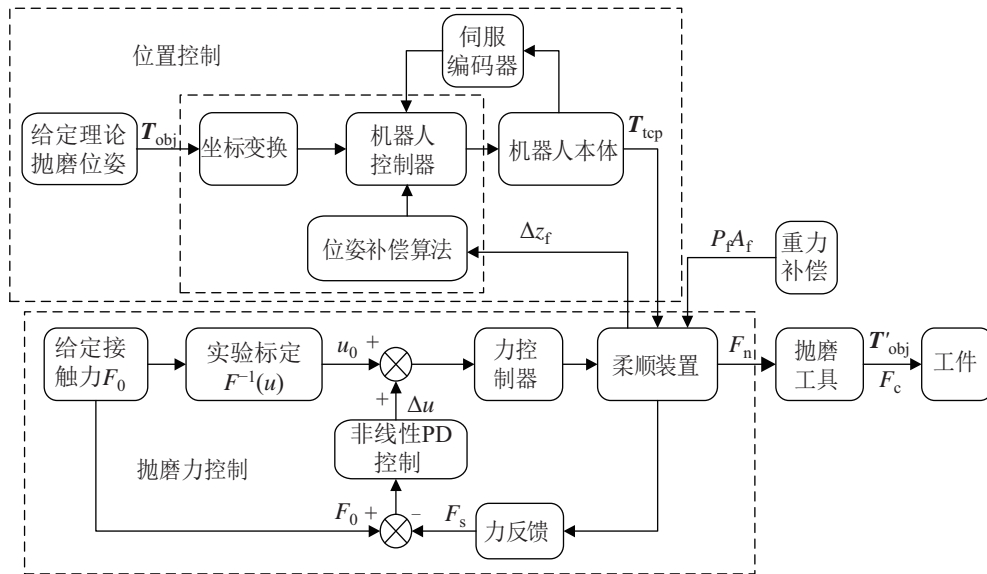


图 5 被动柔顺力/位控制原理图

Fig.5 Schematic diagram of the passive compliant force/position control

3 力/位混合控制策略 (Hybrid force/position control strategy)

在机器人末端执行器与目标物的交互过程中, 环境等因素会对末端执行器所采用的几何路径产生约束, 标定和规划误差等都可能导致末端执行器偏离期望轨迹, 从而使得接触力发生变化. 由于机器人、工件及环境都具有很大的刚性, 为了达到期望的接触力和位置, 需要很精确的控制模型, 这在实际任务中往往很难实现, 并且力控制和位置控制的耦合也使控制变得更加复杂. 本文引进被动柔顺装置, 将力控制和位置控制进行解耦, 对工具末端进行间接的位置控制和直接的力控制. 控制框图如图 5 所示. 位置控制由机器人控制器实现, 力控制由柔顺装置控制器实现. 分散实现的方式使得抛磨系统的力/位混合控制实现更加简单易行.

3.1 位姿补偿策略

被动柔顺装置安装于机器人工具中心点 (TCP), 另一端固定抛磨工具. 柔顺装置的柔性体现在它在 Z 轴方向的长度是可被动调整的. 在抛磨工具中心点建立坐标系 $\{t_1\}$, 如图 6(a) 所示. 图中, h_2 为柔顺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, 柔顺装置内气缸伸缩, 使得装置在 z_f 范围内可调. 因此, h_1 随 z_f 的变化而变化, 表示为

$$h_1 = f(z_f) = z_f + a, \quad 0 \leq z_f \leq b \quad (19)$$

其中, a, b 为常数, z_f 为装置的可调节距离, 其可调节范围为 $[0, b]$. 当 $z_f = 0$ 时, 装置压缩到最短, 此时 $h_1 = a$, 当 $z_f = b$ 时, 装置拉伸到最长, 此时 $h_1 = a + b$. z_f 变量值由位移传感器进行测量采集, 位移传感器的测量范围需不小于 b .

从 TCP 坐标系 $\{tcp\}$ 到抛磨工具中心点的坐标变换为一个平移变换, 因此有

$$T_{tcp}^{t_1} = T(0, 0, -(f(z_f) + h_2)) \quad (20)$$

柔顺装置控制器在每个控制周期对位移偏移量进行检测. 当柔顺装置受力压缩导致 h_1 改变 Δz_f 时, 坐标变换为

$$T_{tcp1}^{t_1} = T(0, 0, -(f(z_f - \Delta z_f) + h_2)) \quad (21)$$

位置控制方法如图 5 中位置控制部分所示. 其中, 位姿偏差补偿需根据位移偏差量的大小来判断是否需要进行. 具体实现流程如图 7 所示.

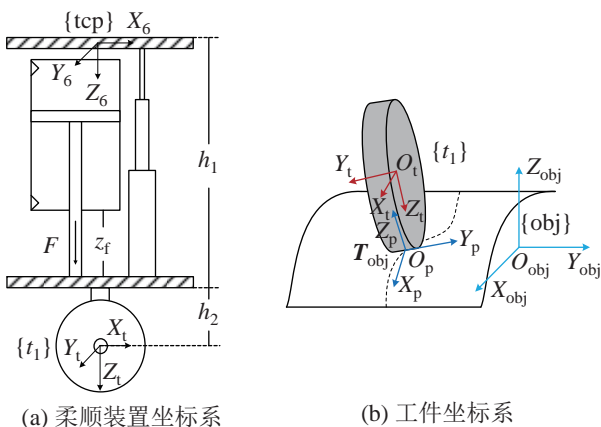


图 6 抛磨坐标系

Fig.6 Polishing coordinate system

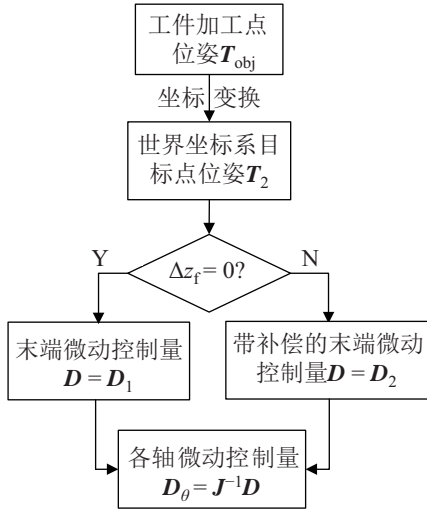


图 7 位姿实现流程图

Fig.7 Process diagram of position and orientation realization

假设基于工件坐标系 $\{obj\}$ 的工件抛磨路径如图 6(b) 所示, T_{obj} 为当前加工点基于 $\{obj\}$ 的目标位姿. 在每个周期中, 将机器人柔性抛磨系统待加工工件抛磨位姿 T_{obj} 通过坐标变换转换为机器人在世界坐标系的目标位姿 T_2 , 与机器人当前反馈位姿 T_1 比较, 通过运动规划, 可以得到末端点的微分运动控制量 D . 当柔顺装置位移调节量较小时, 令 $\Delta z_f = 0$, 此时, 机器人控制器不需要进行位姿补偿. 其末端点的微分运动量为

$$D = D_1 = [dx, dy, dz, \delta x, \delta y, \delta z]^T \quad (22)$$

当柔顺装置受外界干扰使得 h_1 的位移调节量超过阈值时, 则认为 $\Delta z_f \neq 0$, 将偏差值传送到机器人控制器, 对末端位姿进行补偿. 由图 6 可知, 柔顺装置的受力和柔顺变形均发生在 Z 轴方向. 因此, 机器人对末端位姿的补偿可简化为对 Z 轴位置的补偿. 此时, 末端点的微分运动量为

$$D = D_2 = [dx, dy, dz + \Delta z_f, \delta x, \delta y, \delta z]^T \quad (23)$$

由于机器人的末端点的微分运动与各关节的微分运动可表示为

$$D = JD_\theta \quad (24)$$

因此, 有

$$D_\theta = J^{-1}D \quad (25)$$

从而得到各轴的微分运动量 D_θ , 使机器人本体运动到新的位姿, 实现对工具末端位姿 T'_{obj} 的补偿.

3.2 力控制方法

在工业抛磨加工中, 很多工件轮廓为复杂曲面, 在加工过程中, 机器人的位姿需要不断进行调整. 当机器人运行速度较慢或抛磨区域较平滑时,

一个控制周期内机器人位姿调整较小, 对柔顺装置接触力跟随调整的时间要求较低. 当抛磨速度较快或抛磨区域曲率变化较大时, 在很短时间内发生的位姿变化较大, 这对柔顺装置的响应时间提出了较高的要求. 本文提出一种非线性 PD 控制方法, 对工具末端接触力进行控制, 以提高接触力动态响应性能. 控制框图如图 5 抛磨力控制部分所示, 将期望抛磨力 F_0 转换为控制量 u_0 , 力控制器输出信号控制柔顺装置输出力 F_n , 此时工具末端施加在工件上的抛磨力为 F_c . 柔顺装置内伺服阀反馈输出气压, 经计算为反馈力 F_s , 表征该控制周期内末端抛磨力. 与期望抛磨力进行比较, 通过非线性 PD 控制进行控制量调整, 直到力偏差为 0, 调整控制量使 $\Delta u = 0$. 此时, 末端抛磨力 F_c 即为期望抛磨力 F_0 . $P_f A_f$ 用于实现工具重力补偿, 它随抛磨机器人位姿的调整而变化.

在这种非线性 PD 控制器中, 其控制输出为

$$\Delta u(t) = k_p e(t) + k_d(e(t)) \frac{de(t)}{dt} \quad (26)$$

其中, $e(t)$ 为给定力和反馈力的偏差. 非线性环节 k_d 是 $e(t)$ 的函数. 因此, 上式可以看作是一个非线性环节和一般 PD 控制的结合. 控制系统结构图可简化为图 8.

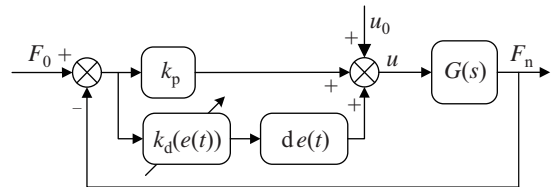


图 8 非线性 PD 控制系统结构图

Fig.8 Structure of the nonlinear PD control system

构造 k_d 为误差 $e(t)$ 的非线性函数:

$$k_d(e(t)) = a_d + \frac{b_d}{1 + c_d \exp(-d_d e(t))} \quad (27)$$

式中, a_d, b_d, c_d, d_d 为正实数, a_d 为 k_d 的最小值, $a_d + b_d$ 为 k_d 的最大值, 当 $e(t) = 0$ 时, $k_d = a_d + \frac{b_d}{1 + c_d}$, 调整 d_d 的大小可调整 k_d 的变化速率.

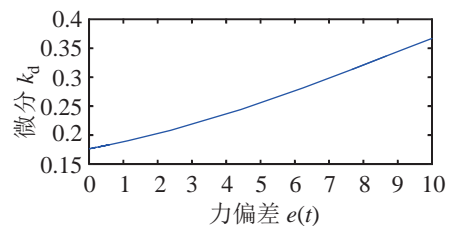


图 9 k_d 随偏差的变化曲线

Fig.9 The variation curve of k_d with deviation

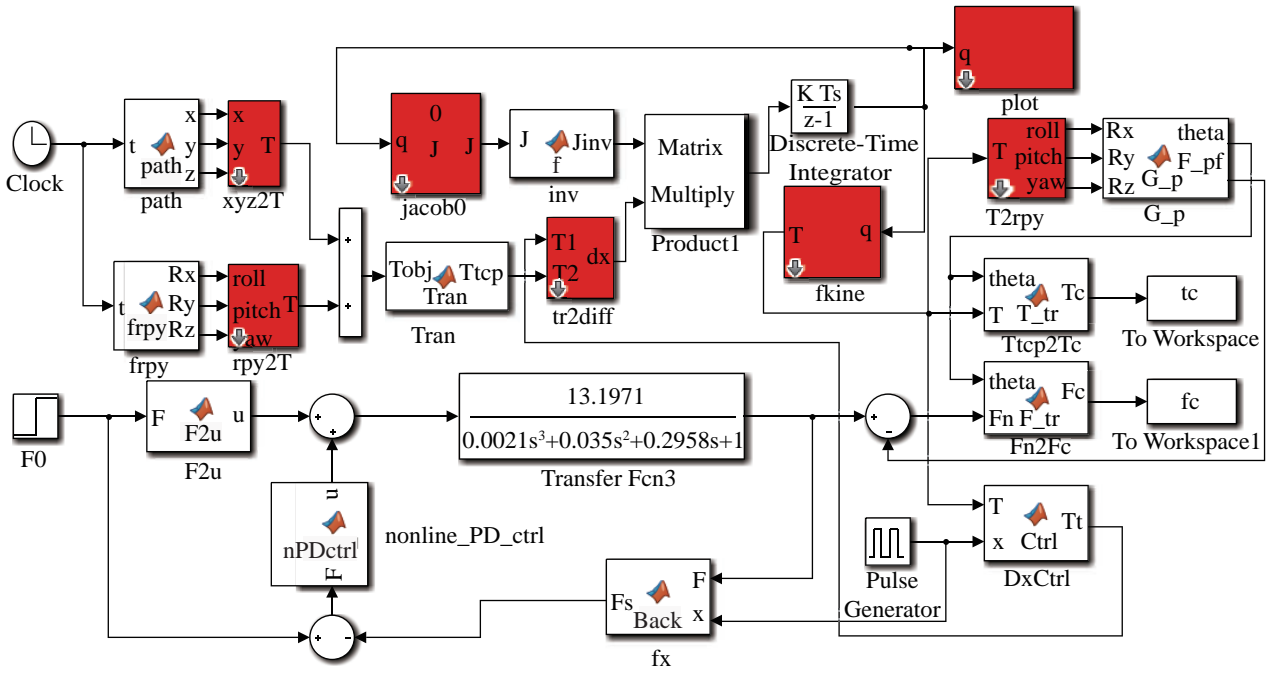


图 10 被动柔顺力/位控制仿真图

Fig.10 Simulation diagram of the passive compliant force/position control

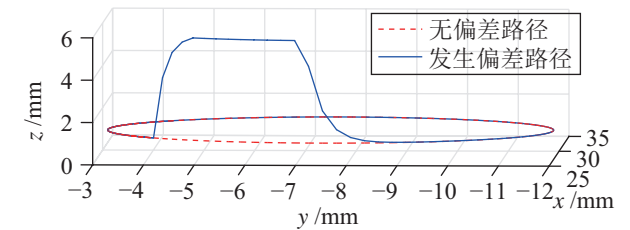
取 $k_p = 0.1364$, $a_d = 0.1137$, $b_d = 0.4396$, $c_d = 6.0$, $d_d = 0.21$, k_d 的变化趋势如图 9 所示。

从图 9 可以看出, 当误差 $e(t)$ 较大时, 控制器输出较大的控制量, 可加速系统向期望值趋近; 当误差相对较小时, 控制器输出较小的控制量, 可抑制系统的超调。非线性 PD 控制与常规 PD 控制一样, 相当于为系统增加了一个零点, 其不改变系统的自然频率, 但可增大系统的阻尼比。由于系统自然频率和阻尼比均与开环增益有关, 因此, 适当选择比例增益和微分时间常数可以改善系统的动态性能, 并且因为微分部分反映的是力偏差的变化率, 因此不影响系统的常值稳态误差, 而它的非线性环节可更好地补偿诸多非线性因素(如摩擦力, 工具与工件接触的等效刚度等)对柔顺装置造成的影响, 因而, 采用非线性 PD 控制可以在不影响系统稳定性的前提下, 提高系统的响应性能。

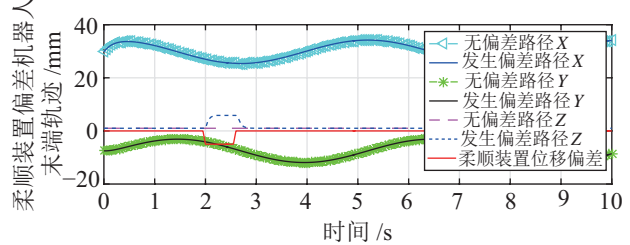
4 仿真 (Simulation)

从图 5 可以看出, 基于柔顺装置的抛磨系统的位置控制和力控制不存在耦合, 是 2 个相互独立的控制环。为验证上述基于柔顺装置的抛磨系统力/位混合控制策略的可行性, 利用 Matlab 和机器人工具箱对控制算法进行仿真。图 10 所示为仿真模型。假设抛磨工具位于路径规划加工点的起始点, 抛磨工具末端与工件刚刚接触, 接触力为 0。仿真过程为: 在 $t = 0$ 时刻, 指定工具末端在 $z =$

1 mm, 沿 XOY 平面, 以 (30 mm, -7.5 mm) 为圆心, 9 mm 为半径做圆作为位置控制的输入, 期望力阶跃信号 $F_0 = 10$ N 作为力控系统的输入。在 $t = 2$ s 时, 使柔顺装置压缩 5 mm, 时长 0.6 s。图 11 为抛磨工具末端在干扰下的位置调节趋势, 图 12 为抛磨力 F_c 在干扰下的变化趋势。



(a) 轴向偏差的路径对比



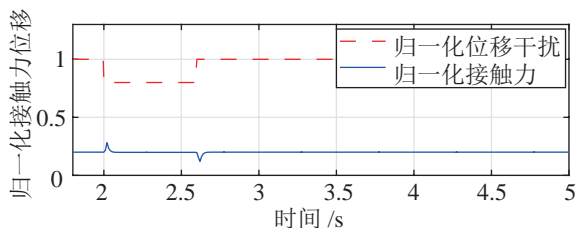
(b) 轴向偏差引起的位置变化

图 11 柔顺装置位移偏差的位置调节仿真

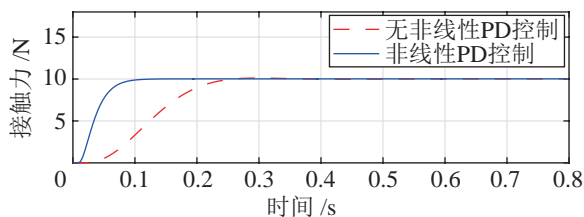
Fig.11 Position adjustment simulation of the compliant device displacement deviation

从图 11(a) 可以看出, 末端位置无偏差的路径为 $z = 1$ mm 平面上、圆心在 (30 mm, -7.5 mm)、直径为 9 mm 的圆。当末端位置产生干扰, 柔顺装置

被压缩产生 5 mm 位移偏差时, 在机器人运行路径上出现沿 Z 方向的增量, 增量最大值为 4.9 mm, 可较好补偿工具末端产生的误差, 保持末端位姿不变. 从图 11(b) 可以看出, 当系统检测到柔顺装置被动柔顺产生的位移偏差时, 仅 Z 轴方向位移发生了改变, 而 X 轴和 Y 轴方向路径并没有发生变化. 这是因为工件加工时机器人末端工具保持与工件法向接触 (即工具坐标系 Z 轴方向), 柔顺装置的受力和柔顺变形均发生在 Z 轴方向. 这使得控制实现变得更加简单易行.



(a) 接触力随位移干扰调节趋势



(b) 被动柔顺力控制曲线

图 12 柔顺装置位移偏差的接触力调节仿真

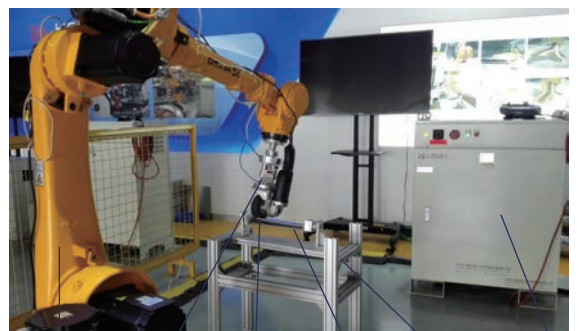
Fig.12 Contact force adjustment simulation of the compliant device displacement deviation

对力控制仿真结果进行归一化处理, 如图 12(a) 所示. 从图中可以看出, 当气缸被压缩时, 偏差出现并持续, 因此输出的接触力先随着气缸的继续被压缩而增大. 当控制器检测到力偏差不为 0 时, 开始对输出力进行调节, 因此当气缸仍然被压缩时, 气压已经开始逐渐恢复至设定值. 0.6 s 后柔顺装置的位移反向恢复, 由于气缸瞬间被动伸长, 因此接触力先随着柔顺装置的变化而减小. 控制器检测到新的力偏差开始进行调节, 并迅速达到了设定值. 从图 12(b) 可知, 加入非线性 PD 控制后, 柔顺装置抛磨力的调节时间由 220 ms 缩短到 60 ms, 且无超调量, 动态响应性能明显改善. 因此, 此非线性 PD 控制算法的控制效果较好.

5 实验验证 (Experimental verification)

为了进一步验证基于被动柔顺的机器人抛磨系统力/位混合控制方法的性能, 搭建基于柔顺装置的机器人抛磨实验平台, 如图 13 所示. 平台由一台工业机器人、柔顺装置、抛磨工具、待加工工件、

工件固定台及控制柜组成. 工业机器人为 6R 型串联机器人, 其型号为 HBR50-C10, 负载能力 50 kg, 重复定位精度 $\pm 0.1\text{mm}$. 柔顺装置安装在机器人的末端, 输出抛磨力范围为 0 ~ 100 N. 柔顺装置另一端连接抛磨工具, 柔顺装置可被动调节位移范围为 0 ~ 25 mm. 机器人柔性抛磨系统的加工过程为: 通过计算机规划好抛磨工具在待加工工件上的抛磨路径, 并将规划好的机器人位置信息传递给机器人控制器, 给定柔顺装置控制器目标接触力控制信号, 开始抛磨加工. 机器人控制器驱动机器人到达相应位置, 接收内部的伺服编码器反馈的位置信息进行内环位置控制, 同时接收外部的柔顺装置返回的末端位移偏差信息, 进行位姿补偿控制. 伺服阀压力传感器反馈柔顺装置与抛磨工具间的力, 进行重力补偿计算得到末端工具与工件间的接触力反馈值, 与给定的期望力比较后, 通过非线性 PD 控制得到新的控制量 u , 力控制器根据控制量调节伺服阀出气量, 从而使抛磨工具和加工工件之间的接触力达到设定值并保持相对恒定.



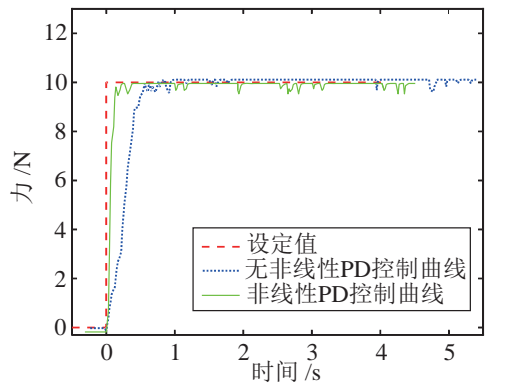
HBR50-C10 工业机器人 柔顺装置 抛磨工具 待加工工件 工件固定台 控制柜

图 13 抛磨作业的实验平台

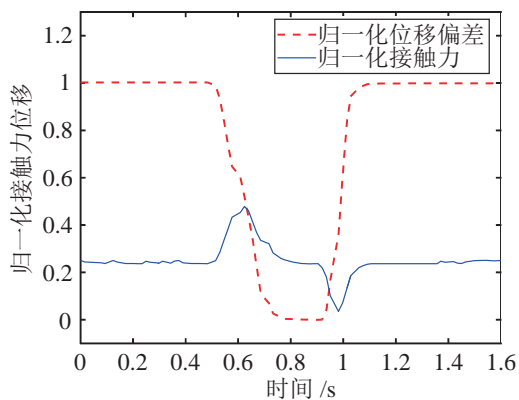
Fig.13 Experimental platform of polishing operation

使机器人处于抛磨工具垂直向下姿态, 即 $\theta = 0$. 工具末端与工件法向接触, 柔顺装置输出力 F_n 刚好抵消工具本身重力. 此时接触力 $F_c = 0$. 设定柔顺装置目标接触力 $F_c = 10\text{N}$, 加入非线性 PD 控制前后接触力变化曲线如图 14(a) 所示. 可以看出, 加入非线性 PD 控制后, 柔顺装置调节时间明显变小, 响应变快且无超调. 实验结果与图 12(b) 所示仿真结果相似. 图 14(b) 表示手动满量程压缩柔顺装置时的末端输出力调节趋势. 当柔顺装置被压缩时, 气缸内压力逐渐增大. 控制器检测到力偏差不为 0 时, 开始进行调节, 所以柔顺装置输出的压力并没有再随着气缸的被压缩而增大, 而是逐渐趋于设定值. 当柔顺装置从压缩状态开始恢复时, 气缸

被动拉伸, 轴向位移逐渐增大, 柔顺装置输出力开始减小. 控制器检测到力偏差不为 0 时, 再次开始调节并使接触力再次稳定于设定力. 该实验结果也印证了图 12(a) 的仿真结果, 这证明了柔顺装置模型的正确性, 也表明了控制算法有效提高了装置的动态响应性能.



(a) 加非线性PD控制前后接触力阶跃响应对比



(b) 归一化位移干扰及接触力响应曲线

图 14 接触力调节响应实验

Fig.14 Experiment of contact force adjustment response

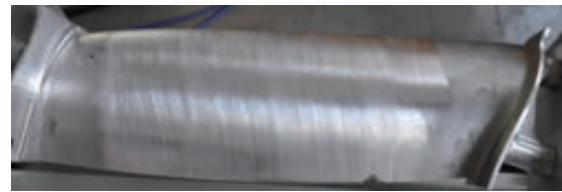
根据计算机规划路径进行叶片打磨加工. 实验所用砂圈半径为 60 mm, 宽度为 20 mm, 工件为铝合金材质的航空叶片. 其他打磨工艺参数见表 1.

表 1 打磨工艺参数

Tab.1 Parameters of the polishing process

工艺	砂圈目数/目	转速/(r/min)	循环次数/次
打磨	600	1000	5
抛光	4000	3000	10

无柔顺装置打磨效果如图 15(a) 所示, 加柔顺装置打磨力 $F_c = 10\text{ N}$ 进行打磨, 效果如图 15(b) 所示. 经对比可以看出, 加柔顺装置打磨的工件表面较光滑均匀, 无明显过抛和欠抛. 使用三丰粗糙度仪 SJ-210 对加工后的工件取样测量, 在相应位置取 2 点, 得到无柔顺装置和加柔顺装置进行打磨的叶片粗糙度曲线图, 如图 16 所示. 无柔



(a) 无柔顺装置抛磨



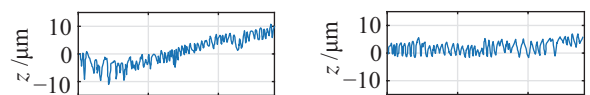
(b) 加柔顺装置抛磨



(c) 加柔顺装置抛光

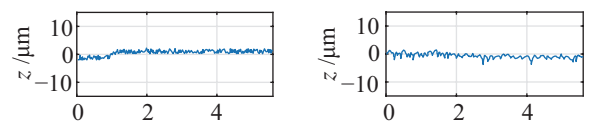
图 15 工件抛磨效果对比

Fig.15 Comparison of the workpiece polishing effect



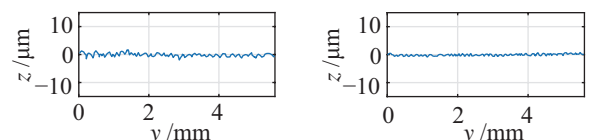
(a) 无柔顺装置打磨: $R_a=2.803$

(b) 无柔顺装置打磨: $R_a=2.721$



(c) 加柔顺装置打磨: $R_a=0.715$

(d) 加柔顺装置打磨: $R_a=0.695$



(e) 加柔顺装置抛光: $R_a=0.311$

(f) 加柔顺装置抛光: $R_a=0.293$

图 16 叶片粗糙度对比

Fig.16 Comparison of the blade roughness

顺装置打磨所得叶片粗糙度 R_a 分别为 $2.803\ \mu\text{m}$ 和 $2.721\ \mu\text{m}$, 而加柔顺装置打磨所得叶片粗糙度 R_a 分别为 $0.715\ \mu\text{m}$ 和 $0.695\ \mu\text{m}$. 因此, 可以证明, 基于柔顺装置的力/位混合控制方案打磨效果更优.

在图 15(b) 基础上, 用 4000 目的砂圈及金刚砂抛光膏保持抛磨机转速 3000 r/min, 抛磨力 $F_c = 2\text{ N}$ 进行精磨, 再经过羊毛轮抛光后, 工件表面如图 15(c) 所示, 可见工件镜面效果较好. 测得此时对应 2 点的表面粗糙度分别为 $0.311\ \mu\text{m}$ 和 $0.293\ \mu\text{m}$. 打磨及抛光加工时的接触力分别如图 17(a) 和 (b) 所示. 实际接触力分别在设定力的 $\pm 0.5\text{ N}$ 和 $\pm 0.3\text{ N}$ 范围内波动, 抛磨力控制稳定性较好.

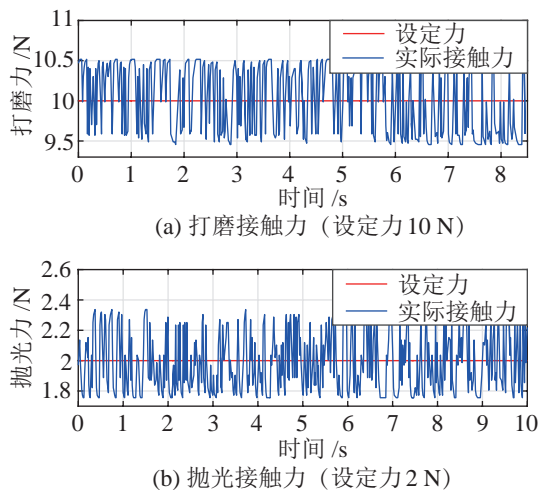


图 17 基于柔顺装置的抛磨加工接触力

Fig.17 Contact force in polishing based on the compliant device

6 结论 (Conclusion)

本文提出了一种基于被动柔顺的机器人抛磨系统力/位混合控制方法. 通过在机器人末端安装一个被动柔顺装置, 该装置在工具坐标系 Z 方向的输出力可通过伺服阀控制气缸腔内气压进行控制. 因此, 只要在加工工件时保持装置和工件的法向接触, 即可对工件加工的接触力进行控制. 推导了柔顺装置的理论模型, 并分析了力控制策略, 采用非线性 PD 控制以提高柔顺装置的动态响应性能. 系统的位置控制由机器人控制器完成, 机器人位置控制内环对机器人末端 TCP 点位置进行控制. 柔顺装置提供末端位移偏差反馈给机器人控制器, 根据偏差大小判断是否需要位姿补偿. 仿真证明, 这种力/位混合控制的方式对工具末端接触力和位置控制进行了解耦, 是相互独立的 2 个控制环, 控制实现简单. 位置控制可有效跟踪给定轨迹和进行位置补偿. 力控制对干扰调节响应迅速. 实验进一步验证了仿真结果, 并通过对航空叶片进行抛磨, 获得良好的表面质量, 从而表明该控制方法有效可行. 该方法也可考虑用于其他接触式作业场合, 例如去毛刺、装配等, 具有较大的应用价值.

参考文献 (References)

- [1] 王田苗, 陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 1-13.
Wang T M, Tao Y. Research status and industrialization development strategy of Chinese industrial robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 1-13.
- [2] Erkaya S. Investigation of joint clearance effects on welding robot manipulators[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012, 28(4): 449-457.
- [3] Valente A. Reconfigurable industrial robots: A stochastic programming approach for designing and assembling robotic arms[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 41: 115-126.
- [4] 刘广保, 赵吉宾, 陈白宁, 等. 有机玻璃研抛机器人自动化工艺研究[J]. 机械设计与制造, 2014(8): 151-154.
Liu G B, Zhao J B, Chen B N, et al. A study of robotic automation process for polymethylmethacrylate grinding and polishing[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(8): 151-154.
- [5] Dietz T, Schneider U, Barho M, et al. Programming system for efficient use of industrial robots for deburring in SME environments[C]//Robotik 2012, 7th German Conference on Robotics. Piscataway, USA: IEEE, 2012.
- [6] 李正义. 机器人与环境间力/位置控制技术研究与应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
Li Z Y. Research and application of robot force/position control methods for robot-environment interaction[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [7] Hogan N. Impedance control - An approach to manipulation. I - Theory. II - Implementation. III - Applications[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement & Control, 1985, 107(1): 1-24.
- [8] 孙逸翔, 陈卫东. 基于运动预测和阻抗控制的未知受限机构操作[J]. 机器人, 2011, 33(5): 563-569.
Sun Y X, Chen W D. Operating unknown constrained mechanisms based on motion prediction and impedance control[J]. Robot, 2011, 33(5): 563-569.
- [9] Xu Q S. Adaptive discrete-time sliding mode impedance control of a piezoelectric microgripper[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2013, 29(3): 663-673.
- [10] 常健, 王亚珍, 李斌. 基于力/位混合算法的 7 自由度机械臂精细操控方法[J]. 机器人, 2016, 38(5): 531-539.
Chang J, Wang Y Z, Li B. Accurate operation control method based on hybrid force/position algorithm for 7-DOF manipulator[J]. Robot, 2016, 38(5): 531-539.
- [11] Singh H P, Sukavanam N. Stability analysis of robust adaptive hybrid position/force controller for robot manipulators using neural network with uncertainties[J]. Neural Computing & Applications, 2013, 22(7-8): 1745-1755.
- [12] Whitney D E, Rourke J M. Mechanical behavior and design equations for elastomer shear pad remote center compliances[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement & Control, 1986, 108(3): 223-232.
- [13] Huang H, Gong Z M, Chen X Q, et al. Robotic grinding and polishing for turbine-vane overhaul[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 127(2): 140-145.

- [13] Kemp C C, Edsinger A. Robot manipulation of human tools: Autonomous detection and control of task relevant features[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Development and Learning. Piscataway, USA: IEEE, 2006: 13-19.
- [14] Tanis M, Vadim T, Giorgio M. Multi-model approach based on 3D functional features for tool affordance learning in robotics [C]//IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 482-489.
- [15] Lenz I, Lee H, Saxena A. Deep learning for detecting robotic grasps[J]. International Journal of Robotics Research, 2015, 34(4/5): 705-724.
- [16] Redmon J, Angelova A. Real-time grasp detection using convolutional neural networks[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 26-30.
- [17] Myers A, Teo C L, Fermuller C, et al. Affordance detection of tool parts from geometric features[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 1374-1381.
- [18] 吴培良, 付卫兴, 孔令富. 一种基于结构随机森林的家庭日常工具部件功用性快速检测算法[J]. 光学学报, 2017, 37(2): No.0215001.
Wu P L, Fu W X, Kong L F. A fast algorithm for affordance detection of household tool parts based on structured random forest[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): No.0215001.
- [19] Abelha P, Guerin F, Schoeler M. A model-based approach to finding substitute tools in 3D vision data[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2016: 2471-2478.
- [20] Schoeler M, Wörgötter F. Bootstrapping the semantics of tools: Affordance analysis of real world objects on a per-part basis[J]. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 2016, 8(2): 84-98.
- [21] Ho T K. Random decision forests[C]//IEEE 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition. Piscataway, USA: IEEE, 1995: 278-282.
- [22] Koenderink J J, van Doorn A J. Surface shape and curvature scales[J]. Image and Vision Computing, 1992, 10(8): 557-564.
- [23] Dollar P, Zitnick C L. Fast edge detection using structured forests[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2014, 37(8): 1558-1570.
- [24] Yang J, Yang M H. Top-down visual saliency via joint CRF and dictionary learning[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 2296-2303.

作者简介:

- 吴培良 (1981-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 家庭服务机器人环境认知, 工具认知, SLAM.
- 何 犇 (1992-), 女, 硕士生. 研究领域: 机器人工具认知.
- 孔令富 (1957-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 服务机器人, 智能信息处理.

(上接第 785 页)

- [14] 张秀丽, 谷小旭, 赵洪福, 等. 一种基于串联弹性驱动器的柔顺机械臂设计 [J]. 机器人, 2016, 38(4): 385-394.
Zhang X L, Gu X X, Zhao H F, et al. Design of a compliant robotic arm based on series elastic actuator[J]. Robot, 2016, 38(4): 385-394.
- [15] Baksys B, Kilikevicius S, Chadarovicius A. Experimental investigation of vibratory assembly with passive compliance[J]. Mechanika, 2011, 17(6): 608-614.
- [16] Kilikevicius S, Baksys B. Dynamic analysis of vibratory insertion process[J]. Assembly Automation, 2011, 31(3): 275-283.
- [17] Jin M S, Ji S M, Pan Y, et al. Effect of downward depth and inflation pressure on contact force of gasbag polishing[J]. Precision Engineering, 2017, 47: 81-89.

作者简介:

- 黄 婷 (1984-), 女, 博士生, 工程师. 研究领域: 工业机器人控制与应用.
- 孙立宁 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 长江学者. 研究领域: 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, 机器人机构与控制.
- 王振华 (1974-), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 工业机器人及智能化装备, 服务机器人, 教育机器人及系统, 微驱动机器人.