

5-15-2020

Force/position Hybrid Control Method for Surface Parts Polishing Robot

Yufeng Ding

School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

Xinpu Min

School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Force/position Hybrid Control Method for Surface Parts Polishing Robot

Abstract

Abstract: A force/position hybrid control method for polishing the complex surface with an industrial robot is put forward. *The method can achieve the stable force control and precise position control to ensure the consistency of the material removal rate at different normal vectors. After the trajectory of the normal vector is planned in CAD software, the force signal feedback from the sensor and the PI controller in the normal vector direction are combined, and the robot end tool corrects the motion trajectory in the vector direction of the surface to indirectly control the contact force between the tool and the surface. As the robot polishing system with different polishing tools has different system stiffness, the adaptive PI control algorithm is proposed and can evaluate the stiffness of the polishing system and adjust the number of PI parameters to ensure the better contact force tracking performance.* The simulation and experiment results show that the method can achieve nicely the polishing of the surface part.

Keywords

industrial robot, polishing, force/position control, surface part, simulation

Recommended Citation

Ding Yufeng, Min Xinpu. Force/position Hybrid Control Method for Surface Parts Polishing Robot[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(5): 817-825.

曲面零件抛光机器人的力/位混合控制方法

丁毓峰, 闵新普

(武汉理工大学机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 提出了一种针对复杂曲面零件的工业机器人抛光力/位混合控制方法, 该方法可以实现稳定的力控制和精确的位置控制, 保证不同法向量处材料去除率的一致。根据规划好的具有法矢量的轨迹, 结合传感器反馈的力信号和法矢量方向的PI控制器, 机器人沿曲面法矢量方向修正运动轨迹间接地实现刀具和曲面间接触力的控制。研究表明安装不同抛光刀具的机器人抛光系统具有不同的系统刚度, 为了保证系统刚度不同的抛光系统具有较好的接触力跟踪性能, 提出了自适应PI控制算法, 对抛光系统刚度进行评估和PI参数的调整。仿真和实验结果表明该方法可以很好地实现曲面零件的抛光。

关键词: 工业机器人; 抛光; 力/位混合控制; 曲面零件; 仿真

中图分类号: TP242.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X(2020)05-0817-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0526

Force/position Hybrid Control Method for Surface Parts Polishing Robot

Ding Yufeng, Min Xinpu

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: A force/position hybrid control method for polishing the complex surface with an industrial robot is put forward. The method can achieve the stable force control and precise position control to ensure the consistency of the material removal rate at different normal vectors. After the trajectory of the normal vector is planned in CAD software, the force signal feedback from the sensor and the PI controller in the normal vector direction are combined, and the robot end tool corrects the motion trajectory in the vector direction of the surface to indirectly control the contact force between the tool and the surface. As the robot polishing system with different polishing tools has different system stiffness, the adaptive PI control algorithm is proposed and can evaluate the stiffness of the polishing system and adjust the number of PI parameters to ensure the better contact force tracking performance. The simulation and experiment results show that the method can achieve nicely the polishing of the surface part.

Keywords: industrial robot; polishing; force/position control; surface part; simulation

引言

在电子产品和汽车等制造领域, 对于零部件



收稿日期: 2018-07-30 修回日期: 2018-12-12;
基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX04011006-005);
作者简介: 丁毓峰(1972-), 男, 吉林, 博士, 副教授, 研究方向为数字制造系统, 智能机器人; 闵新普(1996-), 男, 湖北, 硕士生, 研究方向为工业机器人。

的高质量表面需求越来越多, 尤其模具等具有小尺寸凹型曲面的工件, 其表面的质量要求较高, 抛光是保证这种曲面质量的常用工艺。目前, 曲面零件的抛光主要由熟练技术工人手工完成, 手工抛光通常存在依赖工人技术水平, 生产效率低、加工质量不稳定等问题, 难以满足当今工业发展对凹型曲面零件高质量表面制造的低成本、短周

<http://www.china-simulation.com>

• 817 •

期的要求。针对这种情况,曲面的自动抛光开始受到相关公司和机构的重视。Domroes 等^[1]对去毛刺和磨削的力控制策略进行应用和分析,其实验系统是由负载 60 kg 的 ABB IRB 4400 工业机器人及其相关力控制应用包构成;高强等^[2]以 KUKA KR30-3 工业机器人为主要执行设备搭建基于力控制的柔性研抛系统,基于制造商提供的 RSI (Robot Sensor Interface) 控制技术开发包控制计算机通过 TCP/IP 通信协议实现与机器人的动态交流,达到实时改变机器人的运动状态;Nagata 等^[3]提出了速度和抛光力的阻抗模型,该文通过阻抗模型间接地调整待抛光模具和抛光工具之间的抛光力和沿曲面法向速度来进行模具的抛光,团队开发的抛光实验系统是基于开放式控制结构的工业机器人 Motoman UP-6 的,该工业机器人的优点是:提供了有用的 Windows API 函数,此优点使工程人员对机器人系统控制算法的研究更加方便和灵活。

要进行机器人曲面产品抛光,那么曲面产品加工路径规划就是首先需要解决问题。加工路径是影响零件抛光质量和效率的关键因素。

Nagata 等^[4]开发了一个机器人 CAM 系统,该系统集成了 CAD/CAM 系统前置处理、机器人伺服控制系统和机器人运动学,可以无需机器人示教和机器人控制语言就可实现机器人轨迹的精确跟踪。

Neto 等^[5]开发了一种新的基于 CAD 的机器人编程系统,通过 CAD 图形到实际环境的映射生成机器人的程序,其目的是使了解一点 CAD 软件和机器人的人员也能很好的使用机器人。

由于机器人抛光系统本身的位置精度差,采用纯粹的位置控制无法满足表面抛光的要求,所以研究人员开始尝试将机器人的力控制应用于零件表面的抛光。

Tian 等^[6-7]使用一种带有抗饱和和积分分离模糊 PI 控制器(AISFP)将力信号转化为机器人末端沿曲面法向量法向的轨迹修正量间接地实现法矢

量方向的力控制,通过力信号反推出法矢量的方向,模糊控制可以实现控制参数的调整,进而实现恒力抛光。

Rani 等^[8]针对具有完整性和非完整性约束的受限移动机器人的位置/力控制问题,提出了一种有效的控制方案。提出基于模型的计算力矩控制器与无模型神经网络控制器相结合的控制方法。利用所提出的方法,实现了轨迹的渐近收敛以及约束力收敛到期望的水平。神经网络重构误差以及不确定性的边界由自适应控制部分的控制方案估计。通过数值仿真研究验证了该方法的有效性,并与现有的方法进行了比较。

丁毓峰等^[9]提出了一种针对复杂型腔模具使用工业机器人抛光系统,该机器人抛光系统使用 6 自由度机器人构建,可以实现稳定的力控制和精确的位置控制,且此抛光方法很容易在线实现。

以上研究的力/位控制方法不能完全适合于复杂凹型曲面的工业机器人抛光工艺过程,这类零件轨迹复杂,目前的研究对生成这类零件的轨迹规划系统通用性差,由于轨迹复杂,所以难于实现高精度地进行力/位控制,针对于此,本文展开相关研究,主要研究内容包括首先介绍了基于 CAD 软件 UG 的抛光轨迹生成方法。然后研究了对传感器测得的力信号经过抛光工具重力的补偿得到用于曲面抛光的力信号的方法;提出了根据法向量调整电主轴转速的方法,以保证曲面材料去除的均匀性;提出了根据曲面法向量和机器人的位置控制器的力/位混合控制算法,该方法可以实现抛光过程的力/位置控制。针对不同抛光刀具的抛光系统刚度的差异性,提出了根据系统刚度评估调整控制参数的自适应力/位混合控制算法,并进行了仿真和实验研究。

1 抛光轨迹生成

针对小尺寸凹型曲面零件的抛光,所用刀具是球形抛光工具时,抛光的刀位点是指在工件坐标系

中刀具中心的位置 \mathbf{P} 和刀具与工件表面的接触点处曲面的法矢量 \mathbf{n} , 其矩阵表达形式为 $\mathbf{C}=[\mathbf{P} \ \mathbf{n}]$ 。为了提高抛光轨迹的生成效率, 使用 UG/CAD 软件开发了抛光轨迹生成器, 利用该工具可以获得待加工工件模型表面和刀具接触点 p' 的位置及此点处曲面的法矢量, 然后根据刀具的结构对接触点轨迹进行补偿获得刀具球心的运动轨迹。

p 为球形抛光刀具的球心, 可以看作是沿法矢量方向平移球半径 R 得到的, p 在工件坐标系 $\{O_W\}$ 中的位置通过平移矩阵可以得到

$$\begin{bmatrix} {}^W \mathbf{P}_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^W x_p \\ {}^W y_p \\ {}^W z_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & R \cos {}^W \alpha_{p'} \\ 0 & 1 & 0 & R \cos {}^W \beta_{p'} \\ 0 & 0 & 1 & R \cos {}^W \gamma_{p'} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^W x_{p'} \\ {}^W y_{p'} \\ {}^W z_{p'} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

此点处曲面的法矢量为,

$${}^W \mathbf{n}_p = {}^W \mathbf{n}_{p'} \quad (2)$$

如果工件坐标系 $\{O_W\}$ 相对于机器人基坐标系 $\{O_B\}$ 的齐次变换矩阵为 ${}^B \mathbf{T}$, 抛光工具在基坐标系 $\{B\}$ 中的多轴刀位点为,

$$\begin{bmatrix} {}^B \mathbf{P}_p & {}^B \mathbf{n}_p \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = {}^B \mathbf{T} \begin{bmatrix} {}^W \mathbf{P}_p & {}^W \mathbf{n}_p \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

为了避免抛光过程中, 抛光刀具与凹型曲面的干涉, 抛光工具坐标系 $\{O_T\}$ 的位姿保持不变。假定基坐标系 $\{O_B\}$ 的 ${}^z B$ 轴方向矢量为 $[0 \ 0 \ 1]^T$, 在加工的过程中, 保持工具坐标系 $\{O_T\}$ 的 ${}^z T$ 轴方向矢量为 $[0 \ 0 \ -1]^T$, 即工具坐标系相对于基坐标系的旋转矩阵为一个常量 \mathbf{R} 。

假定常量旋转矩阵 \mathbf{R} 对应的 RPY 角为 ${}^B \mathbf{O}_T = [{}^B \phi_T \ {}^B \theta_T \ {}^B \varphi_T]^T$, 工具坐标系原点在基坐标系中的位置 ${}^B \mathbf{P}_{O_T}$, 即刀具的球心在基坐标系中的位置。 ${}^B \mathbf{P}_{O_T}$ 和 ${}^B \mathbf{O}_T$ 组成 6×1 的笛卡尔空间中的轨迹矢量可以表达为 ${}^B \mathbf{X}_E = [{}^B \mathbf{P}_{O_T}^T \ {}^B \mathbf{O}_E^T]^T$ 。

2 曲面抛光策略

2.1 力信号的测量和重力补偿

在抛光过程中, 球形抛光刀具始终垂直水平面向下, 使用德国 ME3DT120 三轴力传感器对工件和抛光刀具的接触力进行测量。工件表面对抛光刀具的作用力 \mathbf{F}_c 是可以分解沿曲面法向刀具对曲面正压力的反作用力 \mathbf{F}_n 、刀具旋转的摩擦力 \mathbf{F}_r 和移动摩擦力 \mathbf{F}_t 等 3 个力, 即满足

$$\mathbf{F}_c = \mathbf{F}_n + \mathbf{F}_r + \mathbf{F}_t \quad (4)$$

待加工表面对抛光工具的作用力 ${}^S \mathbf{F}_c$ 可以通过安装在机器人末端和抛光工具之间的力传感器测量。在加工过程中, 传感器测得的合力 ${}^S \mathbf{F}_m$ 主要由工件对抛光工具的作用力 ${}^S \mathbf{F}_c$ 、抛光工具的重力 ${}^S \mathbf{F}_G$ 和惯性力 ${}^S \mathbf{F}_I$ 组成^[10], 即满足,

$${}^S \mathbf{F}_m = {}^S \mathbf{F}_c + {}^S \mathbf{F}_G + {}^S \mathbf{F}_I \quad (5)$$

$$\|{}^S \mathbf{F}_m\| = \sqrt{|F_x|^2 + |F_y|^2 + |F_z|^2} \quad (6)$$

式中: F_x , F_y , F_z 分别为传感器 3 个方向的力, 由于插值后的抛光轨迹光滑连续, 抛光工具在相邻两加工点间运动的步长和加速度较小, 所以抛光工具的惯性力 ${}^S \mathbf{F}_I$ 相对于工件和抛光工具之间的接触力 ${}^S \mathbf{F}_c$ 和抛光工具的重力 ${}^S \mathbf{F}_G$ 来说较小, 可以忽略不计。式(5)可以重新写为,

$${}^S \mathbf{F}_m = {}^S \mathbf{F}_c + {}^S \mathbf{F}_G \quad (7)$$

在抛光加工过程中, 抛光工具的重力对抛光作用力 ${}^S \mathbf{F}_c$ 的测量有较大的影响, 所以必须对抛光工具重力进行补偿。在抛光过程中抛光工具的方位保持不变并且其重力与传感器坐标系 $\{O_S\}$ 的 z 轴重合, 当抛光工具未与工件接触时, 抛光力 ${}^S \mathbf{F}_c = 0$, 传感器测得的力 ${}^S \mathbf{F}_m = {}^S \mathbf{F}_G$, 假定抛光工具的重力 ${}^S \mathbf{F}_G = [0, 0, -G]^T$ 。在无需将 ${}^S \mathbf{F}_G$ 转换到基坐标系 $\{O_B\}$ 中的情况下, 可以直接在传感器坐标系 $\{O_S\}$ 中对抛光工具的重力进行补偿, 得到抛光作用力 ${}^S \mathbf{F}_c = {}^S \mathbf{F}_m - {}^S \mathbf{F}_G$ 。

2.2 材料去除率分析

在凹型曲面产品加工过程中, 电主轴的轴线

与机器人基坐标系 z 轴平行, 在待抛光曲面与抛光工具接触点处曲面的法矢量与电主轴轴线的夹角为 α , 也即曲面法矢量和基坐标系 z 轴的夹角。假设球形抛光工具的半径为 R , 与基坐标系 z 轴夹角为 α 处接触点的线速度为,

$$v = \frac{2\pi R \sin(\alpha) n}{60} \quad (8)$$

在进行抛光时, 待抛光曲面与抛光工具之间的接触点会不断地变化, 如果电主轴采用一个统一的转速, 根据式(8)可知, 接触点处抛光工具和曲面之间相对线速度必然随着待抛光曲面法矢量的变化而变化。

Preston 材料去除模型的公式为

$$\frac{dh}{dt} = K_{\text{preston}} PV \quad (9)$$

式中: dh/dt 为材料的去除率; K_{preston} 为 Preston 系数; P 为抛光工具和抛光表面的正压力; V 为抛光工具和待加工表面的相对速度。

由式(9)知, 当抛光工具与曲面之间的正压力保持稳定时, 且电主轴的转速为一个常量, 刀具在位置 1、2 处线速度不同, 工件材料去除率和工具损耗率差异很大, 所以需要根据曲面的法矢量调整电主轴的转速以保证 1、2 处线速度相同以保证位置 1、2 处材料去除率差别不大。由两个位置的线速度相等和式(8), 可以得到:

$$\sin(\alpha_1) n_1 = \sin(\alpha_2) n_2 \quad (10)$$

可见当 α 接近于 0° 时, 电主轴的转速为无穷大, 这显然是不合理的。所以在实际应用过程中, 当曲面的法矢量和基坐标系 z 轴的夹角 $\alpha \leq 5^\circ$

时, 取 $\alpha=5^\circ$ 。在给定机器人的运动命令时, 同时根据曲面的法矢量调整电机的转速, 确保待加工表面的材料去除率不会产生较大的变化。

2.3 基于位置的力/位混合控制及仿真

由材料去除模型分析可知, 当抛光刀具和待加工表面的相对速度一定时, 抛光工具和表面间的接触力是决定工件表面质量的关键因素。接触力的不稳定将导致工件表面材料的去除不均匀, 所以为了保证待加工表面的均匀性, 在整个抛光过程中, 应保证机器人能同时实现精确的位置跟踪和恒定的力接触。因此, 本文提出一种适合于工业机器人抛光的基于位置的力/位混合控制方案, 如图 1 所示。

假设以轨迹点的位置 P 为坐标系原点和法矢量 n 为坐标系的 z 轴得到一系列固定在工件上的坐标系 $\{O_M(i), i=1,2,\dots,n\}$ 。

图 1 中, X_d 为抛光的参考轨迹; 假设力/位混合控制约束坐标系与坐标系 $\{O_M\}$ 重合, 力控子空间为坐标系 $\{O_M\}$ 的 z 轴, 即 $[0 \ 0 \ 1]^T$, z_f 是传感器测得的实际抛光力大小 $\|{}^S F_c\|$ 和期望抛光力大小 $\|{}^S F_d\|$ 的偏差通过力控制律得到的机器人末端刀具沿法矢量方向轨迹修正量的标量, X_f 为末端刀具轨迹在机器人坐标系 $\{O_B\}$ 的修正量, 其中 ${}^B n_M$ 为坐标系 $\{O_M\}$ 的 z 轴在基坐标系的表示, X_c 是修正后的轨迹, $X_c = X_d + X_f$; X 是末端刀具的实际位置; $L^{-1}(X)$ 和 $L(\theta)$ 分别是机器人的逆运动学和正运动学。

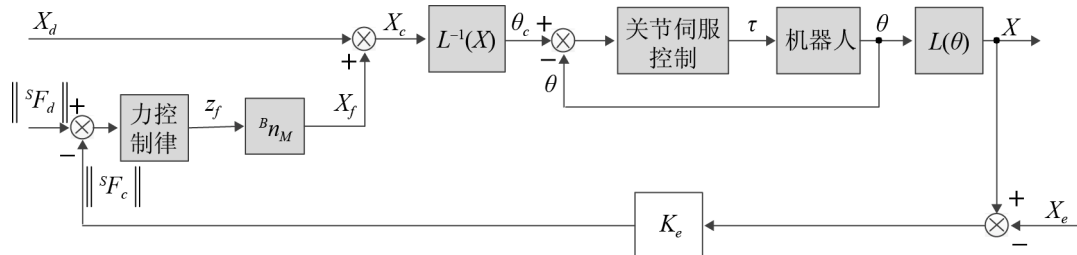


图 1 基于位置控制的力/位混合控制方框图

Fig. 1 Force/Position hybrid control block diagram based on position control

修正后的轨迹 \mathbf{X}_c 更为详细的表示为,

$$\begin{cases} \mathbf{P}_c = \mathbf{P}_d + \mathbf{P}_f \\ \mathbf{O}_c = \mathbf{O}_d \end{cases} \quad (11)$$

式中: \mathbf{P}_c , \mathbf{P}_d , \mathbf{P}_f 分别表示修正后轨迹的位置、期望轨迹位置、轨迹位置修正量。 \mathbf{O}_c , \mathbf{O}_d 表示修正后轨迹的姿态和期望轨迹的姿态。其中 $\mathbf{P}_f = {}^B \mathbf{n}_M z_f$, 由式(11)可以看出, 在抛光过程中仅修正抛光工具的位置矢量而不改变工具的方位。

由于工业机器人通常具有较高的位置跟踪性能, 曲面法向力的控制可以通过法矢量方向轨迹修正量 z_f 的控制间接地实现。本文在法矢量方向采用 PI 控制器产生轨迹修正量 z_f 。由于力控子空间和坐标系 $\{O_M\}$ 的 z 轴重合, 即 $[0 \ 0 \ 1]^T$, 那么在力控子空间内轨迹修正量 z_f 为,

$$z_f = K_p \delta F + K_i \int_0^t \delta F dt \quad (12)$$

式中: $\delta F = \|{}^S \mathbf{F}_d\| - \|{}^S \mathbf{F}_c\|$ 为期望接触力和实际接触力大小的差值。

最后得到机器人位置控制系统输入的轨迹命令为:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_c = \mathbf{P}_d + {}^B \mathbf{n}_M z_f \\ \mathbf{O}_c = \mathbf{O}_d \end{cases} \quad (13)$$

公式表明, 通过力控制子空间的 PI 控制器将在机器人坐标系 $\{O_B\}$ 的 x , y , z 三个自由度方向产生轨迹修正量。

对于抛光系统, 系统刚度 k 是工作台、工件、抛光刀具、力传感器和机器人本身等设备刚度的综合, 其中假设其他设备的刚度很大, 系统刚度近似的为力传感器 k_s 和抛光刀具 k_t 的刚度综合,

$$k = \frac{k_s k_t}{k_s + k_t} \quad (14)$$

为了了解系统刚度的范围, 将式(14)变形为

$$k = \frac{k_s}{1 + k_s/k_t} \quad (15)$$

当抛光刀具的刚度很大, 例如金刚石、油石、砂轮, 即 $k_t \gg k_s$, 系统刚度为:

$$k \approx k_s \quad (16)$$

当抛光刀具的刚度较小, 例如海绵,

$$\begin{cases} k_t < k_s/100 \\ k < k_s/101 \end{cases} \quad (17)$$

所以, 系统的刚度可能在小于传感器刚度的几个数量级之间变化。

在进行抛光作业时, 可以根据不同的抛光工艺要求采用不同的抛光刀具, 例如羊毛、橡胶和橡胶磨料球形抛光刀具等。根据式(15)可知, 使用不同的抛光刀具, 系统的刚度自然就会存在差异。以下是机器人末端安装橡胶磨料球形抛光刀具在曲面法矢量与基坐标系的夹角为 45° 方向的位移和力的关系。

图 2 中的位移初始点 0 是抛光工具与工件第一次接触的点, 使用 MATLAB 中的最小二乘法对测得的数据进行拟合, 可以得到位移和接触力的关系, 可见随着抛光刀具沿着曲面法矢量方向的位移增大抛光系统的刚度会增大; 安装有不同材料抛光刀具的系统刚度会有很大的差异。

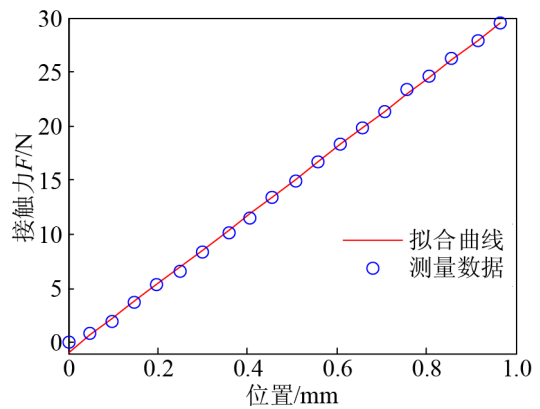


图 2 安装橡胶磨料抛光刀具的抛光系统位移和接触力关系

Fig. 2 Relationship between displacement and contact force of polishing system with rubber abrasive polishing tools

由于抛光工具的偏心、电主轴的旋转振荡和其他一些不可预知的因素, 抛光工具坐标系原点的位置在垂直于电主轴轴线的方向上会出现微小、连续和较为复杂的变化。为了进行仿真, 这里做简化处理。假设这个变化规律为正弦

$$\Delta x_e(t) = a \sin(bt) \quad (18)$$

式中： a 为垂直于电主轴轴线的方向振动幅值，其值很小，假设为 0.1 mm ； b 为角频率，假设其与电主轴转速成正比。设曲面法矢量和基坐标系 z 轴的夹角 $\alpha=45^\circ$ 时，电主轴的转速 n_{45} 。根据式 (10)，曲面上法矢量与基坐标系 z 轴夹角 α 为的任意一点 p_α 处电主轴的转速为，

$$n_\alpha = \frac{\sin(45^\circ)}{\sin(\alpha)} n_{45} \quad (19)$$

那么式(19)中 n_α 对应的角频率 b_α 为，

$$b_\alpha = \frac{\pi \sin(45^\circ)}{30 \sin(\alpha)} n_{45} \quad (20)$$

由几何知识，可以知道刀具与曲面接触点 p_α 处沿曲面法矢量方向振动幅值的最大值为

$$a_\alpha = a \sin(\alpha) \quad (21)$$

p_α 点处抛光头沿曲面法矢量方向的振动变化规律为

$$\delta_n^\alpha(t) = a \sin(\alpha) \sin\left(\frac{\pi \sin(45^\circ)}{30 \sin(\alpha)} n_{45} t\right) \quad (22)$$

建立的基于位置的力/位混合控制仿真模型如图 3 所示。仿真条件如下：参考轨迹是一条与机器人基坐标系 x 轴平行的长 10 mm 的直线段；曲面法矢量和基坐标系 z 轴的夹角 $\alpha=45^\circ$ ，式(18)中的干扰信号的角频率为 $b=40\pi$ ；期望的抛光力 $^s F_d = 4 \text{ N}$ ；PI 控制器的参数为 $K_P=2 \times 10^{-4}$ ， $K_I=2 \times 10^{-5}$ 。

为了避免抛光过程中机器人出现奇异点，根据机器人的结构和连杆参数确定的工作空间，确定机器人末端在基坐标系中的停机点为 $[0.5, 0, 0.1]^T$ ，单位为 m 。

安装有橡胶磨料球形抛光刀具的抛光系统的抛光力随时间变化的仿真结果如图 4 所示。在 $0 \sim 1 \text{ s}$ 内，机器人未与工件接触，在自由空间中运动。安装橡胶磨料球形抛光刀具时，抛光刀具和工件之间实际接触力和期望接触力的偏差大于 $\pm 4 \text{ N}$ 。所以，对于刚度不同的刀具，法向方向的 PI 力控制器应该采用不同的控制参数来保证系统对期望接触力有较强的跟踪性能。

通过仿真实验研究，发现抛光系统整体的刚度不同对机器人抛光力控制有较大的影响。一般适合于系统刚度小的 PI 参数较大，而适合于系统刚性大的 PI 参数较小。如果将适合于系统刚度小的 PI 参数用于系统刚性大的系统，系统可能出现剧烈的振荡甚至影响系统的稳定性；如果将适合于系统刚性大的 PI 参数用于系统刚度小的系统，也许不会影响系统的稳定性，但系统对于抛光过程中存在的各种干扰的响应较慢，所以为了使系统表现出良好的动态性能，一般希望依据系统的刚度来调整 PI 参数以适应不同刚度的抛光刀具。

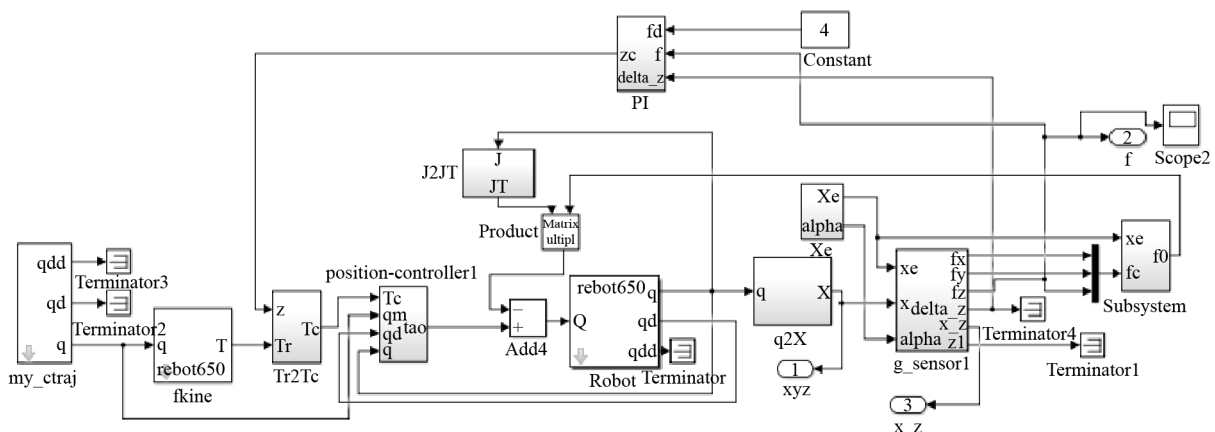


图 3 基于位置的力/位混合控制仿真模型

Fig. 3 Position-based hybrid force/position control simulation model

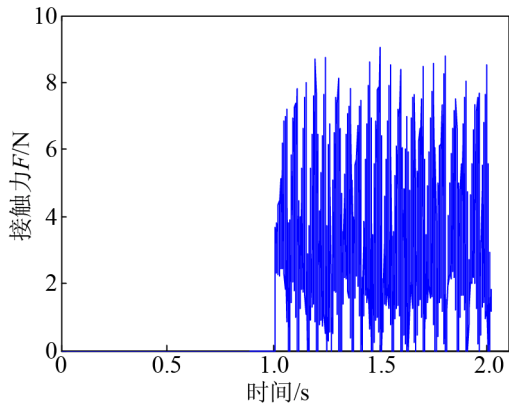


图 4 橡胶磨料球形抛光刀具接触力随时间的变化
Fig. 4 Rubber abrasive ball polishing tool change in contact force change over time

为了解决该问题, 提出一种根据系统刚度评估调整 PI 参数的自适应力控制方法, 如图 5 所示。满足,

$$K_i = a \left(\frac{1}{k_0} + \left| \frac{1}{k} - \frac{1}{k_0} \right| \right) + b |\delta F| \quad (23)$$

$$K_p = 5K_i$$

式中: $\delta F = \| {}^S F_d \| - \| {}^S F_c \|$; k_0 为系统初始刚度, 如果 k_0 取的较小, 当机器人末端与较为刚性环境接触时, 机器人会出现震荡, 所以 k_0 的取值较大, 虽然与环境接触时无法保证系统具有良好的性能, 但系统基本可以实现稳定。假设系统刚度的变化的范围是 10 000 ~60 000 N/m, 取 $k_0 = 60 000$; a 、 b 为常系数; 当出现较大的干扰时, $b|\delta F|$ 可以使接触力快速地回到给定的期望值。

设抛光系统沿曲面法向的压缩量和接触力的函数关系符合下面形式的多项式

$$f = a_n u^n + a_{n-1} u^{n-1} + \dots + a_0 \quad (24)$$

式中: u 为抛光系统沿曲面法向的压缩量; f 为接触力的大小。使用最小二乘法拟合出安装羊毛球形抛光刀具、橡胶球形抛光刀具和橡胶磨料球形抛光刀具的系统沿曲面法向压缩量和接触力的函数关系式,

$$\text{羊毛: } f = 4.262 6u^2 + 8.239 1u - 0.164 3$$

$$\text{橡胶: } f = 2.689 7u^2 + 25.243 8u - 0.458 4 \quad (25)$$

$$\text{橡胶磨料: } f = 31.491 4u - 0.887 1$$

同理, 拟合出各种抛光刀具刚度和接触力的函数关系式,

$$\text{羊毛: } k = 0.52f + 9.684 3$$

$$\text{橡胶: } k = 0.189 2f + 25.445 8 \quad (26)$$

$$\text{橡胶磨料: } k = 31.491 4$$

式中: k 为系统的刚度。

3 种刀具的系统刚度随接触力变化的曲线如图 6 所示。抛光系统刚度的估计分为 2 个部分, 分别为抛光刀具的判断和刚度的估计。抛光刀具的判断主要通过压缩量 u 和接触力的函数关系式(25)来判断正在进行抛光的刀具为哪一种; 刚度的估计指在确定刀具后将期望的接触力带入到式(26)中计算出对应刀具的系统刚度。

在抛光的开始阶段, 通过压缩量 u 和位置接触力的函数关系式计算出接触力 f , 取一定数量 n 的计算接触力 f 和实际接触力大小 $\| {}^S F_c \|$ 偏差的绝对值和 σ ,

$$\sigma = \sum_{i=1}^n |f(i) - \| {}^S F_c(i) \| | \quad (27)$$

最小 σ 值所对应的抛光刀具即为进行抛光所用的刀具。

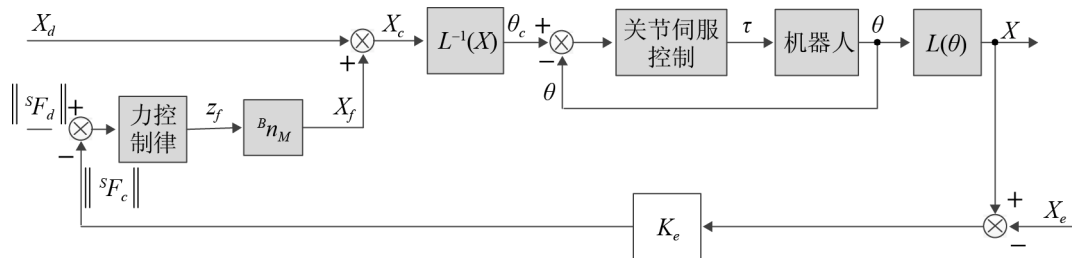


图 5 基于位置的自适应力/位混合控制原理方框图
Fig. 5 Position-based adaptive force/position hybrid control principle block diagram

为未加工曲面。

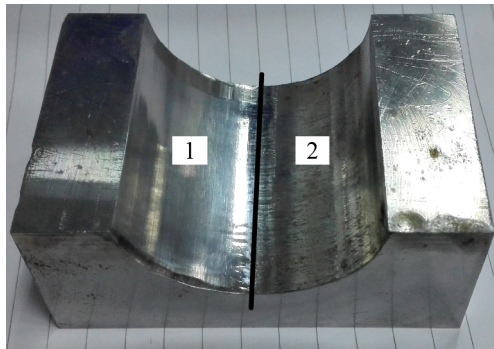


图 9 抛光后的凹型曲面
Fig. 9 Concave surface after polishing

从对比的情况来看, 零件的区域 1 比未加工的区域 2 的工件表面较为光亮, 加工精度明显要高, 说明基于力/位控制的抛光算法可以有效地提高凹型曲面的质量。

4 结论

针对曲面零件手工抛光生产效率低下、加工质量不稳定等问题, 提出了一种适合于工业机器人的基于位置的力/位混合控制的抛光方法。在分析抛光刀具的受力的基础上, 使用了一种简单的重力补偿得到抛光刀具和曲面之间的接触力; 研究了曲面材料去除原理, 提出一种根据曲面法矢量调整电主轴转速的方案; 为了实现曲面法矢量方向的恒力抛光, 本文使用 PI 控制器得到法矢量方向的轨迹修正量间接地实现力/位混合控制, 通过对控制算法进行仿真研究和分析, 发现抛光系统的刚度对于力的跟踪性能有较大的影响, 针对此问题, 提出了一种自适应的力/位混合控制算法, 使机器人抛光系统具有较好的力跟踪性能。

本文实验研究使用的曲面零件尺寸不大, 而实际工作中例如汽车轮毂等曲面零件尺寸大, 要求能够实现高效抛光作业, 如何提高大尺寸复杂曲面零件的抛光效率是下一步需要研究的任务。

参考文献:

- [1] Domroes F, Krewet C, Kuhlenkoetter B. Application and Analysis of Force Control Strategies to Deburring and Grinding[J]. *Modern Mechanical Engineering (S2164-0181)*, 2013, 3(2): 11-18.
- [2] 高强, 田凤杰, 宋建新. 基于力控制的机器人柔性研抛加工系统搭建[J]. *制造技术与机床*, 2015(10): 41-44. Gao Qiang, Tian Fengjie, Song Jianxin. Design of Flexible System for Robotic Grinding and Polishing Based on Force Control[J]. *Manufacturing Technology and Machine Tools*, 2015(10): 41-44.
- [3] Nagata F, Hase T, Haga Z, et al. CAD/CAM-based Position/Force Controller for a Mold Polishing Robot[J]. *Mechatronics (S0915-3942)*, 2007, 17(4/5): 207-216.
- [4] Nagata F, Yoshitake S, Otsuka A, et al. Development of CAM System Based on Industrial Robotic Servo Controller without Using Robot Language[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing (S0736-5845)*, 2013, 29(2): 454-462.
- [5] Neto P, Mendes N. Direct Off-line Robot Programming via a Common CAD Package[J]. *Robotics & Autonomous Systems (S0921-8890)*, 2013, 61(8): 896-910.
- [6] Tian F, Lv C, Li Z, et al. Modeling and Control of Robotic Automatic Polishing for Curved Surfaces[J]. *Cirp Journal of Manufacturing Science & Technology (S0007-8506)*, 2016, 14: 55-64.
- [7] Tian F, Li Z, Lü C, et al. Polishing Pressure Investigations of Robot Automatic Polishing on Curved Surfaces[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology (S0268-3768)*, 2016, 87(1/4): 1-8.
- [8] Rani M, Kumar N, Singh H P. Efficient Position/Force Control of Constrained Mobile Manipulators[J]. *International Journal of Dynamics and Control (S2195-268X)*, 2018(4): 1-10.
- [9] 丁毓峰, 付巍巍. 工业机器人模具抛光方法研究及仿真[J]. *机械设计与研究*, 2017(4): 131-135. Ding Yufeng, Fu Weiwei. Research and Simulation of Mold Polishing Methods for Industrial Robots[J]. *Mechanical Design and Research*, 2017(4): 131-135.
- [10] 杨林, 赵吉宾, 李论, 等. 有机玻璃研磨抛光机器人力控制研究[J]. *机械设计与制造*, 2015(4): 105-107. Yang Lin, Zhao Jibin, Li Lun, et al. A Study of Grinding and Polishing Robot Force Control for Plexiglass[J]. *Mechanical Design and Manufacture*, 2015(4): 105-107.