

基于位置控制的工业机器人力跟踪刚度控制

吴炳龙^{1,2}, 曲道奎^{1,3}, 徐方^{1,3}

(1.中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 2.中国科学院大学, 北京 100049;
3.沈阳新松机器人自动化股份有限公司, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 随着机器人技术的发展, 要求机器人能够完成更加复杂的任务, 如工业机器人的打磨、精密装配、人机协作等, 因此机器人与环境交互的能力起着越来越重要的作用。但当前的柔顺控制方法存在局限性, 无法像人类一样, 时刻对外界环境的作用力具有很强的适应能力(阻抗性能), 并且能够随时对外界环境施加所需要的力(力的跟踪性能)。为了解决该问题, 提出一种新的力跟踪刚度控制方法, 能够让机器人同时具有阻抗性能和力的跟踪性能。该控制系统结构简单, 实用性较强。控制系统的建立是基于位置控制的工业机器人模型, 并进行了仿真, 仿真结果表明, 机器人不仅具有刚度控制的特点, 对外界约束环境有顺从性, 同时能够对期望力很好地进行跟踪。

关键词 机器人; 力控制; 显式力控制; 阻抗控制; 力跟踪阻抗控制; 柔顺控制

中图分类号 :TH16; TP242 **文献标识码** :A **文章编号** :1001-3997(2019)01-0219-04

Force Tracking Stiffness Control for the Position-Based Industrial Robot

WU Bing-long^{1,2}, QU Dao-kui^{1,3}, XU Fang^{1,3}

(1.State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Liaoning Shenyang 110016, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.Shenyang SIASUN Robot & Automation Co., Ltd., Liaoning Shenyang 110168, China)

Abstract :With the development of robot technology, robots are required to complete more complex tasks, such as industrial robot grinding, precision assembly, human-robot interaction, therefore the ability of the robot interacts with the environment is becoming more and more important. But the current compliance control method has limitations, unlike humans, we have a strong ability to adapt to the external environment at any moments (impedance performance), and can apply force what we need to the external environment(force tracking performance). In order to solve this problem, a new force tracking impedance control method was proposed, this method can make robots get impedance performance and force tracking performance. The structure of this control system is simple and have good practicability. Control system establishment is based on the model of position-based industrial robot, and then done the simulation experiments, the experimental results show that the robot not only have the characteristics of stiffness control which made robot with compliance to the external environmental constraints, but also can tracking the desired force under different environmental constraints.

Key Words Robot; Force Control; Explicit Force Control; Impedance Control; Force Tracking Impedance Control; Compliance Control

DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.2019.01.057

1 引言

随着机器人技术的发展, 要求机器人能够完成更加复杂的任务, 如工业机器人的打磨、精密装配、人机协作等。而其中的关键是机器人与环境交互的能力。当前机器人与环境交互的方式有多种多样, 主要分为两大类^[1], 一类是直接力控制, 可实现机器人的力跟踪特性, 直接控制机器人与环境的接触力; 另一类是间接力控制, 可实现机器人的阻抗特性, 以适应外界环境的不确定性变化。二者在实际应用中起着各自的作用, 独立且不相容, 但都具

有局限性, 即当机器人具有力跟踪性能时, 不具有阻抗特性, 反之亦然。而当前并没有一种很好的控制方法, 能够同时包容以上两类方法, 以此为目标, 提出一种结构方式非常简单的柔顺控制方法, 能够同时实现机器人的直接力控制和间接力控制。

直接力控制是指直接控制机器人末端和环境的接触力, 直接力控制的包括显式力控制^[2]和力/位混合控制^[3]。直接力控制策略直观上允许对末端执行器环境之间的接触力进行直接控制, 这是实现许多机器人控制任务所必需的。但是, 直接力控制方法的缺点是需要详尽的任务描述, 任务规划量大, 不适用于自由运

来稿日期: 2018-07-20

基金项目: 辽宁省科技创新重大专项(113003)

作者简介: 吴炳龙(1988-)男, 福建莆田人, 博士研究生, 主要研究方向: 机器人控制;

曲道奎(1961-)男, 山东青州人, 博士研究生, 研究员, 主要研究方向: 智能机器人技术

动,从自由运动到约束运动的转化需要控制模式的切换。

间接力控制,包括刚度控制、阻尼控制和阻抗控制^[4-5]。其中,阻抗控制是在阻尼控制和刚度控制的基础上发展起来的,是通过调节由用户设定的机器人末端位置偏差和力的动态关系来实现柔顺控制的目的,这里的动态关系称为目标阻抗,目标阻抗模型的设计是阻抗控制的核心,也是阻抗控制的困难之处。阻抗控制具有任务规划量、实时计算量较少、对系统的不确定性和扰动具有较强的鲁棒性等优点。但阻抗控制的主要缺点是不具备精确的力跟踪能力,不适用于机器人和环境需要精确力控制的任务。

为了融合间接力控制和直接力控制的优点,摒弃二者各自的缺点,有学者对此进行了研究,并提出了一些方法,力跟踪阻抗控制^[6]方法,为了让阻抗控制达到精确的力控制,需要精确的环境位置和刚度信息,但这在实际中是不可能的。变刚度阻抗控制^[7]方法,通过调整阻抗控制的刚度,实现阻抗控制的力跟踪,但该方法只能在接触环境的时候才能实现,并且动态响应比较差,力的变化不够平缓。基于扭矩的力和阻抗控制一体^[8]方法,当前的工业机器人阻抗控制完整模型是个二阶的模型,而基于位置环实现的力跟踪算法本质上是PID的各种变形(如纯积分控制、比例+积分控制、比例+位置反馈),该方法采用直接融合了二阶阻抗控制和PID控制的方法,由于二阶阻抗模型和PID模型的融合,导致整个控制系统模型阶次升高,变得复杂且为非无源性(不稳定),因此该方法设计了复杂的能量存储算法保证系统的稳定性。通过简化并融合阻抗控制模型和PID模型,旨在提出一种简单实用的融合直接力控制和间接力控制方法,该方法为力跟踪刚度控制,通过刚度控制的方法实现机器人对外界环境的柔顺性,同时采用对偏差的积分,实现力跟踪控制算法,该算法结构简单实用,具有一般性,能够应用在工业机器人的工作场合,甚至服务机器人的场合。

2 基于位置控制的机器人阻抗控制

阻抗控制通过调节由用户设定的机器人末端位置偏差和力的动态关系来实现柔顺控制的目的,该动态关系就是阻抗模型:

$$M\ddot{X}_{dc} + B\dot{X}_{dc} + KX_{dc} = F \quad (1)$$

式中 $X_{dc} = X_d - X_c$, X_d —规划的轨迹值; X_c —机器人控制器的给定值; M —惯性矩阵; B —阻尼矩阵; K —刚度矩阵,当机器人在自由空间上运动的时候, $X_d = X_c$, 机器人按照规划的轨迹运行。

当机器人在约束环境上运动时,会产生一定的接触力,控制器通过接触力和阻抗模型倒数的乘积修正规划的轨迹值,从而控制机器人实际的位置值,使机器人具有一定柔顺性。基于位置控制的阻抗控制框图如图1所示。

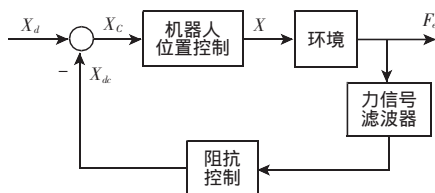


图1 基于位置控制的阻抗控制框图

Fig.1 Impedance Control Structure Based on Position Control

在刚度控制中,阻抗模型中的 $M=0$ 、 $B=0$ 则有:

$$K(X_d - X_c) = F \quad (2)$$

当机器人末端接触到外界环境时,机器人与规划轨迹的位置偏差仅由接触力和设定的刚度系数矩阵 K 倒数的乘积决定。刚度系数越大时,柔顺性越小,刚度系数越小时,柔顺性越大。为了实现机器人的柔顺性,采用线性的刚度控制。如果采用阻抗控制,控制系统容易震荡不稳定,需要更加复杂的控制设计^[8]。

3 力跟踪刚度控制

提出的力跟踪刚度控制的框图如图2所示。核心思想是通过力误差的积分控制实现了机器人对力的跟踪控制,通过力反馈的修正期望轨迹实现了机器人对外界环境的适应性。如下图所示,该控制方法可以根据需要进行切换,当不需要力控制特性时,开关切换到1,即机器人只是在期望轨迹上运动,并具有适应环境的柔顺性;当需要力控制特性是,开关切换到2,机器人在保有柔顺性的同时,也能够进行力的跟踪控制。以下是对力闭环的分析。

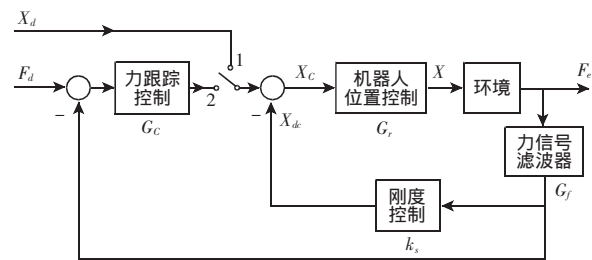


图2 力跟踪刚度控制框图

Fig.2 Force Tracking Stiffness Control Structure

其中,机器人的位置控制系统传递函数为:

$$G_r = \frac{1}{1+T_r s} e^{-T_d s} \quad (3)$$

式中: T_r —机器人位置环控制环节上升时间常数; T_d —控制系统的延迟采样时间(常采用 0.004s 或 0.001s),又 T_d 很小,则有 $G_r \approx \frac{1}{1+T_r s} \frac{1}{1+T_d s} \approx \frac{1}{1+(T_r+T_d)s}$; $G_f = \frac{1}{1+T_f s}$ —力信号滤波器的传递函数; T_f —滤波器时间常数; $k_s = \frac{1}{K}$ —刚度控制中力对期望轨迹的修正系数。令力跟踪控制器为力误差的积分。

$$x_d = k_i \int (f_d - f) dt = \int e_f dt \quad (4)$$

$$\text{即 } G_c = \frac{k_i}{s}$$

则控制系统的闭环传递函数为:

$$\Phi = \frac{k_e G_c G_r}{1 + k_e G_c G_r G_f + k_s k_e G_r G_f} = \frac{k_i k_e (1+T_f s)}{(T_r T_f + T_d T_f) s^3 + (T_r + T_d + T_f) s^2 + (1+k_e k_s) s + k_i k_e} \quad (5)$$

则特征方程:

$$D = (T_r T_f + T_d T_f) s^3 + (T_r + T_d + T_f) s^2 + (1+k_e k_s) s + k_i k_e \quad (6)$$

由劳思稳定判据得:

$$k_i < \frac{(T_r + T_d + T_f)(1+k_e k_s)}{(T_r T_f + T_d T_f) k_e} \quad (7)$$

系统的稳态误差为:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s F_d(s) [1 - \Phi(s) G_f(s)] \quad (8)$$

当输入信号为阶跃信号时 $F_d(s) = F_d/s$ 稳态误差:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s) = 0 \quad (9)$$

4 仿真

提出了力跟踪刚度控制的方法,融合了刚度控制和力控制方法的优点,为了验证力跟踪刚度的特性,如图3所示,以工业机器人进行了仿真,仿真的约束环境分别为平面和曲面,环境是固定不变的。进行力跟踪控制仿真时的期望力设定为10N。根据实际机器人控制系统的参数,本次仿真的相关参数,如表1所示。

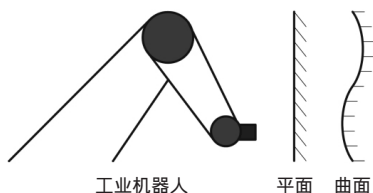


图3 工业机器人与环境接触仿真

Fig.3 The Simulation of Industrial Robot Contact with Environment

表1 仿真控制系统参数

Tab.1 The Simulation Parameter of Control System

T_r	0.032s
T_d	0.004s
T_f	0.032s
k_s	1/1000

4.1 机器人阻抗性

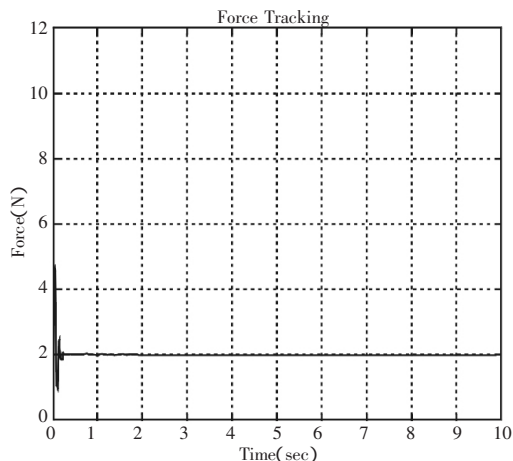


图4 机器人的刚度控制仿真

Fig.4 The Simulation of Robot Stiffness Control

首先切换至阻抗模式,验证力跟踪刚度控制的阻抗性,仿真过程中,当机器人未接触到约束环境时,机器人可以按规划轨迹运行,机器人所受的接触力为0。当机器人接触到约束环境时,产生相互作用力,在本次仿真中,机器人最终位置的规划值为 X_d ,约束环境位置值为 X_e ,且 $X_d - X_e = 0.0025m$,环境刚度为 $4000N/m$,如果机器人没有采用刚度控制将产生10N的接触力,但在仿真过程中,机器人由于刚度控制的作用,并没有完全运行到期望位置,而是根据外界作用力的大小在期望轨迹上产生一定的偏移,适应约束环境。如图4所示,最终机器人与环境的作用力为2N,因此采用阻抗/刚度控制的机器人具有顺从外界约束环境的能力,但是对接触力的大小是不可控的,不可精确预知的,因为我们

无法精确知道环境初始位置和刚度信息,微小环境信息偏差,机器人与环境的接触力就会产生较大的变化^[9]。

4.2 机器人力跟踪

接着切换至力闭环模式,验证力跟踪刚度控制的力跟踪特性,力跟踪仿真分别在平面环境和曲面环境进行。

4.2.1 平面环境

首先进行平面环境下的阶跃信号响应,此时力跟踪刚度控制的积分控制参数 $k_i=0.008$,环境的刚度 $k_e=4000N/m$ 。仿真结果,如图5所示。当机器人从自由空间接近时,与外界的接触力为0;当机器人接触到环境时,接触力逐渐上升并最终达到稳定的期望值。

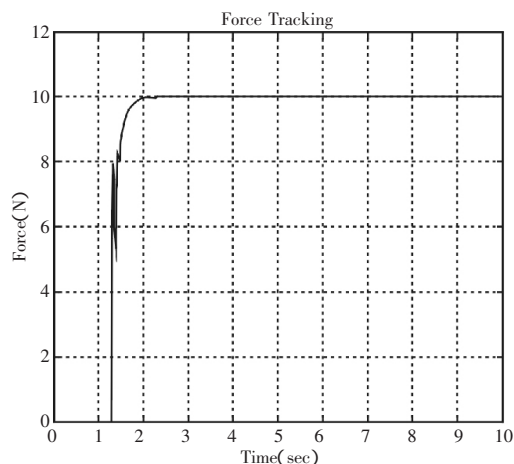


图5 阶跃信号的力跟踪仿真

Fig.5 Step Signal Force Tracking Simulation

接下来是平面环境下的正弦信号响应,此时力跟踪刚度控制的积分控制参数 $k_i=0.008$,环境的刚度 $k_e=4000N/m$ 。仿真结果,如图6所示。当机器人从自由空间接近时,与外界的接触力为0;当机器人接触到环境时,接触力逐渐上升并能够很好的跟踪期望的正弦信号。

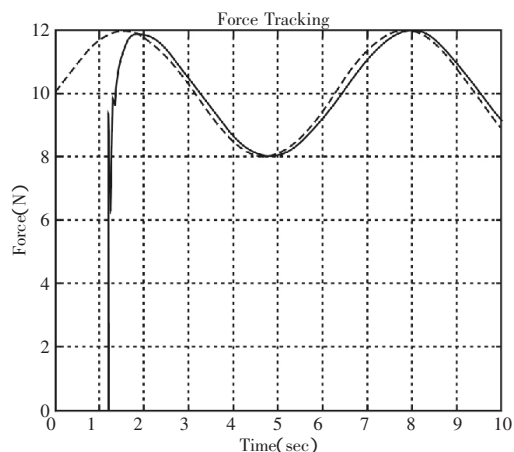


图6 正弦信号的力跟踪仿真

Fig.6 Sinusoidal Signal Force Tracking Simulation

4.2.2 变刚度环境

接下来是在变刚度的阶跃响应,首先是外界环境刚度变小的情况,在前半段平面的刚度为 $k_e=4000N/m$,在后半段平面的刚度为原先的一半,即 $k_e=2000N/m$,仿真结果,如图7所示。机器人

在前半段能够跟踪阶跃信号, 当其所接触的外界的刚度变小时, 接触力减小, 在经过短暂的调整, 又能重新跟踪阶跃信号。

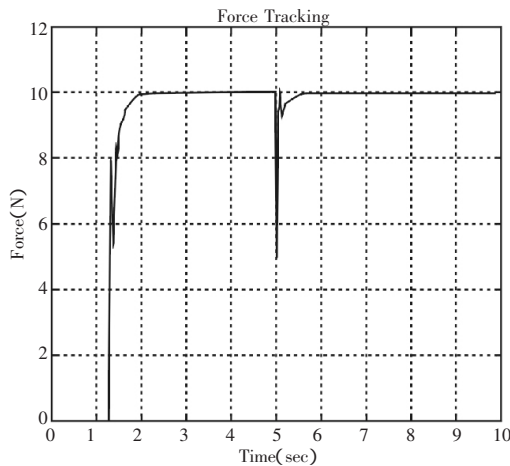


图7 环境刚度变小的力跟踪仿真
Fig.7 Force Tracking Simulation of Environmental Stiffness Becomes Smaller

接下来是外界环境刚度变大情况下的阶跃响应, 在前半段平面的刚度为 $k_e=4000\text{N/m}$, 在后半段平面的刚度为原先的两倍, 即 $k_e=8000\text{N/m}$, 仿真结果如图8所示。机器人在前半段能够跟踪阶跃信号, 当其所接触的外界的刚度变大时, 接触力突然增加, 并发生震荡, 在经过多次震荡, 又能重新跟踪阶跃信号, 当刚度增大较大时, 将无法跟踪阶跃信号, 系统会出现不稳定。

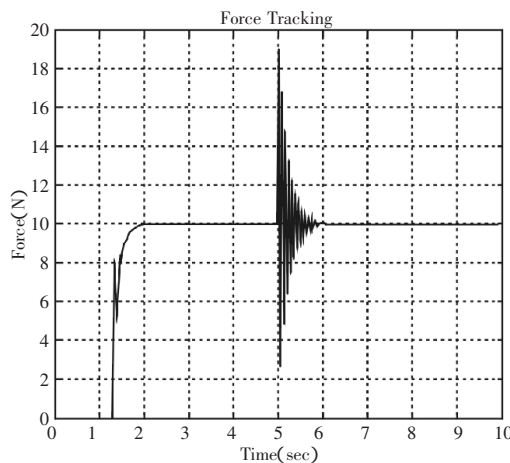


图8 环境刚度变大的力跟踪仿真
Fig.8 Force Tracking Simulation of Environmental Stiffness Becomes Bigger

4.2.3 曲面环境

在曲面环境下的阶跃信号响应曲线, 在仿真中力跟踪刚度控制的积分控制参数 $k_i=0.008$, 曲面的刚度为 $k_e=4000\text{N/m}$, 形状为 $x_e=x_0+0.01\sin(0.2\pi t)$, 其中 $0 < t < 10\text{s}$, 从图9可以看出, 接触力能够跟踪期望值, 但会在期望值一定的范围内波动, 是由于在力跟踪的过程中, 高刚度外界环境发生变化会导致接触力较大的变化, 如在刚度为 4000N/m , 0.01m 就会产生 40N 的变化, 因此机器人力跟踪需要一定的调整时间, 导致作用力会在期望值的范围内波动, 波动的范围与环境的刚度、曲面的变化幅度和力跟踪的响应速度有关。

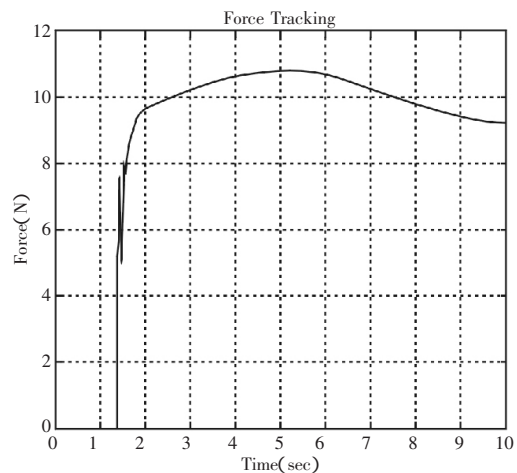


图9 曲面环境的力跟踪仿真
Fig.9 Force Tracking Simulation of Curved Environment

5 结论

提出一种新的柔顺控制方法, 即基于位置控制的工业机器人力跟踪刚度控制, 该方法通过力闭环的积分控制实现力的直接控制, 通过刚度控制实现力的间接控制, 整个控制系统结构简单, 通过理论分析和仿真结果, 得出结论如下:

控制系统是稳定且无稳态误差, 能够实现机器人在平面、曲面、刚度下降的约束环境下对期望力的跟踪性能。

控制系统是使机器人能够具有阻抗性, 使机器人无论在自由空间移动, 还是在于约束环境下的力跟踪控制, 都具有阻抗特性, 保证机器人的柔顺性和安全性。

控制系统融合直接力控制和间接力控制的优点, 两者的结合可以让机器人控制更加像人类与外界的交互方式。

参考文献

- [1] Siciliano B, Villani L. Robot force control[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [2] Volpe R, Khosla P. A theoretical and experimental investigation of explicit force control strategies for manipulators[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1993, 38(11): 1634-1650.
- [3] 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.
- [4] Hogan N. Impedance control: An approach to manipulation. Part II—Implementation[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1985, 107(1): 8-16.
- [5] 文忠, 钱晋武, 沈林勇. 基于阻抗控制的步行康复训练机器人的轨迹自适应[J]. 机器人, 2011, 33(1): 142-149.
(Wen Zhong, Qian Jin-wu, Shen Lin-yong. Trajectory adaptation for Impedance Control based walking rehabilitation training robot[J]. Robot, 2011, 33(1): 142-149.)
- [6] Seraji H, Colbaugh R. Force tracking in impedance control[J]. The International Journal of Robotics Research, 1997, 16(1): 97-117.
- [7] Lee K, Buss M. Force tracking impedance control with variable target stiffness[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 6751-6756.
- [8] Schindlbeck C, Haddadin S. Unified passivity-based cartesian force/impedance control for rigid and flexible joint robots via task-energy tanks[C]. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2015: 440-447.