

沿任意倾斜面的机器人力/位置控制方法研究

李正义 唐小琦 熊 烁 叶伯生

华中科技大学国家数控系统工程技术研究中心, 武汉, 430074

摘要: 设计了沿任意倾斜面的机器人自适应阻抗控制方法, 该方法解决了接触面法向方向、环境阻尼、刚度参数未知对机器人力/位置控制的影响问题。在机器人与倾斜面碰撞接触过程中采用递归最小二乘(RLS)算法估计环境的阻尼、刚度, 根据接触力矩实际值与期望值的偏差实现机器人末端期望姿态的调整; 在机器人末端沿倾斜面滑动阶段, 设计规则自调整的模糊控制器, 根据机器人末端位移、接触力误差实时调整机器人阻抗控制模型参数, 以适应环境阻尼、刚度的变化。提出的控制方法具有编程实现简单且对环境参数变化鲁棒性较强的优点, 实验验证了控制方法的有效性。

关键词: 机器人; 阻抗控制; 参数调整; 模糊控制

中图分类号: TP242

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2012.03.012

Study on Robot Force Position Control Method for Arbitrarily Inclined Plane Tracking

Li Zhengyi Tang Xiaoqi Xiong Shuo Ye Bosheng

The State Engineering Research Center of Numerical Control System,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

Abstract: This paper introduced an adaptive impedance control of a robot for the arbitrarily inclined plane tracking, it overcomes the problem of force position tracking for the constraint surface with unknown normal direction and uncertainties of the environmental damping and stiffness. The proposed method used the recursive least square algorithm to estimate the environment damping and stiffness during the impact-contact, and achieved the expected attitude adjustment for the robot end-effector based on the difference between the actual and expected contact moment. During the robot end-effector sliding on the inclined plane, a rule self-adjusting fuzzy logic controller was developed to adjust the robot impedance control parameters on-line based on the robot end-effector position and force tracking errors to adapt to the variations of the environmental damping and stiffness. The designed robot force position control method is robust to the changes of the environmental parameters, but the implementation of the algorithm programming is simple. The experiments demonstrate the effectiveness of the approach.

Key words: robot; impedance control; parameter adjusting; fuzzy control

0 引言

机器人与未知环境间的力/位置控制主要研

究减小未知环境的几何参数和动力学参数(惯量、阻尼、刚度)对控制系统性能的影响及如何提高机器人力/位置控制的自适应能力等, 其中关于机器人与任意倾斜面间的力/位置控制以其环境模型相对简单受到众多学者青睐。文献[1-2]给出了

收稿日期: 2010-12-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875099, 20100192); 国家科技重大专项(2009ZX04014-052)

[3] Shpitalni M, Koren Y, Lob C C. Realtime Curve Interpolators[J]. Computer-Aided Design, 1994, 26(11): 832-838.

[4] Yong T, Narayanasami R. A Parametric Interpolation with Confined Chord Error Acceleration and Deceleration for NC Machining[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(13): 1249-1259.

[5] Nam S H, Yang M Y. A Study on a Generalized Parametric Interpolator with Real-time Jerk-limited Acceleration[J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(1): 27-36.

[6] Du Daoshan, Liu Yadong, Yan Cunliang, et al. An Accurate Adaptive Parametric Curve Interpolator for NURBS Curve Interpolation [J]. Int. Adv.

Manuf. Technol., 2007, 32: 999-1008.

[7] 曹宇男, 王田苗, 陈友东, 等. 插补前 S 加减速在 CNC 前瞻中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(5): 594-599.

[8] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 王海涛, 男, 1980 年生。南京航空航天大学机电学院博士研究生。主要研究方向为机电一体化、数控技术。发表论文 4 篇。赵东标, 男, 1963 年生。南京航空航天大学机电学院教授、博士研究生导师。陆永华, 男, 1977 年生。南京航空航天大学机电学院副教授、博士。刘凯, 男, 1981 年生。南京航空航天大学机电学院副教授、博士。

基于机器人关节角位移、角速度的斜面法向矢量在线自适应计算公式,但算法收敛较慢;文献[3-4]根据机器人关节角位移和机器人末端接触力设计了能同时进行斜面法向方向估计和实现力/位置控制的算法,接触面切向速度恒定,但算法复杂、难以工程实现;文献[5]结合力觉、视觉和位移传感器实现了任意斜面上的机器人力/位置控制;文献[6]对比研究了未知环境参数(阻尼、刚度)估计的几种方法,指出各种方法应用于机器人力/位置控制的优缺点;文献[7]提出利用递归最小二乘(recursive least squares, RLS)算法估计环境阻尼和刚度参数,并设计了基于神经网络的PI控制器实时补偿环境参数估计误差。总之,机器人与环境间的力/位置控制算法较复杂、难以工程实现,目前大都处于仿真阶段,设计易于实现的机器人与环境间的力/位置控制方案有着重要意义。

本文设计了机器人自适应阻抗控制方法以实现机器人末端执行器沿任意倾斜面的力/位置控制,主要包括利用机器人末端与接触面碰撞接触激发环境的动态特性,由RLS算法估计环境的阻尼、刚度;接触稳定后,根据接触力矩调整机器人末端姿态到期望值;在机器人末端沿斜面滑动过程中,由于机器人末端位移相对值变化小,接触力测量噪声大,设计了基于位移和接触力反馈的模糊控制器以实时修正阻抗控制模型的阻尼和刚度参数,使其满足环境的阻尼、刚度变化和补偿估计误差的需要。

1 机器人阻抗控制模型

Hogan^[8]提出了机器人阻抗控制方法,该方法通过将机器人末端力/位置控制等效为“弹簧—质量—阻尼”模型,建立了机器人末端位移与接触力的关系,并通过任意调节惯性、阻尼、刚度参数来调整机器人末端位置与接触力的关系,阻抗控制克服了机器人力/位置混合控制中力控制与位置控制频繁切换的缺点。机器人阻抗控制理想模型为^[7]

$$\begin{aligned} & \mathbf{M}_d(\ddot{\mathbf{X}}(t) - \ddot{\mathbf{X}}_d) + \mathbf{B}_d(\dot{\mathbf{X}}(t) - \dot{\mathbf{X}}_d) + \\ & \mathbf{K}_d(\mathbf{X}(t) - \mathbf{X}_d) = \mathbf{E}(t) \quad (1) \\ & \mathbf{E}(t) = \mathbf{F}_d - \mathbf{F}_e(t) \end{aligned}$$

式中, $\mathbf{X}(t)$ 为机器人末端当前位置; \mathbf{X}_d 为机器人末端期望位置; $\dot{\mathbf{X}}(t)$ 和 $\ddot{\mathbf{X}}(t)$ 的一阶、二阶导数表示对应的速度、加速度; \mathbf{M}_d 为机器人阻抗模型理想惯性矩阵; \mathbf{B}_d 为阻抗模型理想阻尼矩阵; \mathbf{K}_d 为阻抗模型理想刚度矩阵(为实现解耦控制, \mathbf{B}_d 、 \mathbf{K}_d 和 \mathbf{M}_d 都取为 $l \times l$ 正定对角矩阵, l 为机器人工作空间维数); \mathbf{F}_d 为机器人末端期望接触力; $\mathbf{F}_e(t)$ 为实

际接触力。

机器人阻抗控制就是通过调整参数 \mathbf{M}_d 、 \mathbf{B}_d 和 \mathbf{K}_d 实现机器人末端期望的位移和接触力控制。机器人阻抗控制中的环境常近似为“弹簧—阻尼”系统^[7]:

$$\mathbf{F}_e = \mathbf{B}_e(\dot{\mathbf{X}}(t) - \dot{\mathbf{X}}_e) + \mathbf{K}_e(\mathbf{X}(t) - \mathbf{X}_e) \quad (2)$$

式中, \mathbf{B}_e 、 \mathbf{K}_e 为环境的阻尼矩阵和刚度矩阵; \mathbf{X}_e 为环境未发生变化时的位置; $\mathbf{X}(t)$ 为环境变化后的位置; $\dot{\mathbf{X}}(t)$ 、 $\dot{\mathbf{X}}_e$ 为环境变形前后的速度; \mathbf{F}_e 为作用于环境的合外力。

2 环境参数对机器人阻抗控制的影响

机器人阻抗控制应用于机器人与环境间力/位置控制时,环境参数未知或变化使控制系统的动静态性能变差,分析环境的刚度、阻尼对机器人与环境间力/位置控制性能的影响是应用机器人阻抗控制的基础^[6]。

2.1 稳定误差影响

当机器人末端与环境接触并处于稳定状态时,对于机器人阻抗控制模型(式(1))有

$$\mathbf{F}_e - \mathbf{F}_d = \mathbf{K}_d(\mathbf{X} - \mathbf{X}_d)$$

对于环境模型(式(2)),则有

$$\mathbf{F}_e = \mathbf{K}_e(\mathbf{X} - \mathbf{X}_e)$$

为实现 $\mathbf{F}_d = \mathbf{F}_e$,要求

$$\mathbf{X}_d = \mathbf{X}_e + \mathbf{F}_d/\mathbf{K}_e$$

定义机器人实际控制目标轨迹 \mathbf{X}_r 为“参考轨迹”,取

$$\mathbf{X}_r = \mathbf{X}_e + \mathbf{F}_d/\mathbf{K}_e$$

用 \mathbf{X}_r 替换式(1)中的 \mathbf{X}_d ,得

$$\mathbf{M}_d\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{B}_d\dot{\mathbf{X}}(t) + (\mathbf{K}_e + \mathbf{K}_d)(\mathbf{X}(t) - \mathbf{X}_r) = \mathbf{0}$$

易知当时间 $t \rightarrow \infty$ 时,机器人末端位移:

$$\mathbf{X}(t) \rightarrow \mathbf{X}_r = \mathbf{X}_e + \mathbf{F}_d/\mathbf{K}_e$$

机器人末端与环境间接触力:

$$\mathbf{F}(t) = \mathbf{K}_e(\mathbf{X} - \mathbf{X}_e) \rightarrow \mathbf{F}_d$$

即同时实现了机器人末端期望的接触力和位置控制,但实际应用机器人阻抗控制时, \mathbf{K}_e 的值大多是未知的或是变化的,需在线计算 \mathbf{K}_e 。

2.2 动态性能影响

将式(2)代入式(1)并令 $\mathbf{X}_e = \mathbf{X}_d$,将机器人与环境间相互作用等效为二阶系统,此二阶系统的阻尼系数 ξ 和无阻尼振荡角频率 ω_n 满足^[7]:

$$\begin{aligned} \omega_n &= \sqrt{\frac{k_d + k_e}{m_d}} \\ \xi &= \frac{b_d + b_e}{2\sqrt{(k_d + k_e)m_d}} \end{aligned}$$

其中, m_d 、 k_d 、 b_d 、 k_e 和 b_e 分别为矩阵 \mathbf{M}_d 、 \mathbf{K}_d 、 \mathbf{B}_d 、 \mathbf{K}_e 和 \mathbf{B}_e 中对应的元素,表示某一方向上的等效质量、刚度和阻尼。由于 ω_n 和 ξ 决定了二阶系统动

态性能,因此,当环境参数(k_e, b_e)变化导致(ω_n, ξ)变化时,为保持设定的机器人与环境间力/位置控制系统动态性能不变,阻抗控制模型参数(m_d, k_d, b_d)必须根据环境变化实时调整。调整的方法一种是实时测量或根据环境模型计算出(k_e, b_e)的值,修改(m_d, k_d, b_d)以补偿环境的变化;另一种方法是设计智能控制器,根据机器人末端位移和接触力反馈实时调整(m_d, k_d, b_d),降低环境变化对系统动态性能的影响。本文设计的力/位置控制方法在机器人与环境作用不同阶段分别采用这两种方法提高系统对环境参数未知或变化的自适应能力。

3 沿倾斜面的机器人力/位置控制设计

机器人沿倾斜面的力/位置控制主要是机器人末端沿接触面法向方向的接触力跟踪控制和沿接触面切向方向的轨迹控制,实际任务(抛光、打磨)中一般给定接触面法向期望接触力、机器人末端姿态与倾斜面间的夹角和沿接触面切向的轨迹,因此,应用机器人阻抗控制实现沿倾斜面的力/位置控制时,需解决机器人末端姿态、环境阻尼、刚度未知的问题。本文在机器人末端与环境碰撞接触过程中利用 RLS 算法估计环境参数($\mathbf{B}_e, \mathbf{K}_e$),接触稳定后由接触力矩计算出机器人末端姿态调整旋转矩阵;在机器人末端沿倾斜面滑动阶段,设计模糊控制器实时调整系统参数($\mathbf{B}_d, \mathbf{K}_d$),实现机器人力/位置控制对环境参数($\mathbf{B}_e, \mathbf{K}_e$)变化的自适应性。

3.1 环境参数($\mathbf{B}_e, \mathbf{K}_e$)初值估计

利用 RLS 算法估计环境参数($\mathbf{B}_e, \mathbf{K}_e$)的值,在环境模型(式(2))中,考虑某一特定方向上环境模型,环境模型为标量表达式, b_e, k_e, x 和 f_e 分别为 $\mathbf{B}_e, \mathbf{K}_e, \mathbf{X}, \mathbf{F}_e$ 中某一方向上的阻尼、刚度、位移和力, $\delta x = x(t) - x_e$,得 $f_e = b_e \delta \dot{x} + k_e \delta x$,其离散 z 变换为^[7]

$$f_e = (b_e \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} + k_e) \delta x$$

式中, z 为复变量; T 为采样时间。

对应差分方程为

$$f_e(k) + f_e(k-1) = (b_e \frac{2}{T} + k_e) \delta x(k) +$$

$$(k_e - b_e \frac{2}{T}) \delta x(k-1)$$

$$k = 1, 2, \dots$$

将其改写为

$$Y(k) = \boldsymbol{\varphi}^T(k) \boldsymbol{\theta}(k)$$

$$\boldsymbol{\theta}(k) = [\mathbf{A}_1(k) \quad \mathbf{A}_2(k)]^T$$

$$a_1 = b_e \frac{2}{T} + k_e$$

$$a_2 = k_e - b_e \frac{2}{T}$$

$$\boldsymbol{\varphi}(k) = [\delta x(k) \quad \delta x(k-1)]^T$$

$$Y(k) = f_e(k) + f_e(k-1)$$

则由 RLS 算法得 $\boldsymbol{\theta}(k)$ 的计算式如下:

$$\boldsymbol{\theta}(k) = \boldsymbol{\theta}(k-1) + \mathbf{G}(k)(Y(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k)\boldsymbol{\theta}(k-1))$$

$$\mathbf{G}(k) = \frac{\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k)}{\lambda + \boldsymbol{\varphi}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k)}$$

其中, $\mathbf{G}(k)$ 为增益因子; λ 为遗忘因子,一般取 0.9; $\mathbf{P}(k)$ 为参数估计协方差矩阵,其递归计算式为

$$\mathbf{P}(k) = \frac{1}{\lambda} (\mathbf{P}(k-1) - \frac{\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k)\boldsymbol{\varphi}^T(k)\mathbf{P}(k-1)}{\lambda + \boldsymbol{\varphi}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k)})$$

在迭代计算过程中,当 $\boldsymbol{\theta}(k)$ 值变化小于设定阈值时,认为 $\boldsymbol{\theta}(k)$ 值是稳定的,得到 $\boldsymbol{\theta}(k)$ 值后由 a_1, a_2 的计算式得(b_e, k_e)估计值分别为

$$\hat{b}_e(k) = T \frac{a_1 - a_2}{4}$$

$$\hat{k}_e(k) = \frac{a_1 + a_2}{2}$$

依照类似的方法可得其他方向上的(b_e, k_e)参数,若为提高(b_e, k_e)估计的准确性,可让碰撞接触过程中系统处于欠阻尼状态^[6],获得笛卡儿空间三个相互垂直方向上的(b_e, k_e)后,组合即为环境的阻尼和刚度矩阵($\mathbf{B}_e, \mathbf{K}_e$)。

3.2 机器人末端姿态调整

机器人末端受力如图 1 所示, \mathbf{v}_n 为机器人末端速度,只要在初始接触时调整好机器人末端相对倾斜面的姿态,以后机器人末端沿倾斜面滑动时不用调整姿态,因此,本文采用在机器人末端与倾斜面初始稳定接触时根据接触力矩调整机器

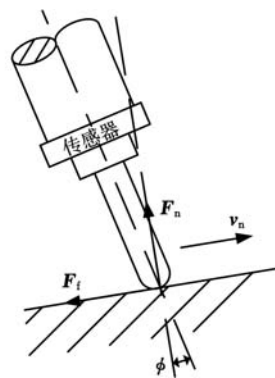


图 1 机器人与斜面接触示意图

人末端姿态。 \mathbf{F}_n 为倾斜面法向压力, \mathbf{F}_t 为摩擦力,由于机器人末端与倾斜面初始稳定接触时沿倾斜面运动趋势较弱,可忽略 \mathbf{F}_t ,则在当前姿态下, \mathbf{F}_n 在机器人末端产生力矩为 $\mathbf{M}_n(k)$,设机器人末端在期望姿态下 \mathbf{F}_n 可产生力矩 \mathbf{M}_d ,定义

$e_m(k) = \mathbf{M}_d - \mathbf{M}_n(k)$, 当前机器人末端姿态调整旋转矩阵在机器人工具坐标系下为 ${}^T\mathbf{R}(k+1)$ (力传感器坐标系与工具坐标系 T 重合)^[9]:

$${}^T\mathbf{R}(k+1) = \mathbf{I} + \frac{\sin\theta}{\|\mathbf{u}\|}\mathbf{S}(\mathbf{u}) + \frac{1-\cos\theta}{\|\mathbf{u}\|^2}\mathbf{S}^2(\mathbf{u})$$

$$k = 0, 1, 2, \dots$$

其中, \mathbf{I} 为单位阵; \mathbf{u}, θ 分别为等效旋转轴矢量和旋转角度; $\mathbf{S}(\mathbf{u})$ 表达式参考文献[9], $\theta(k+1) = k_\theta |e_m(k)|$, $\mathbf{u}(k+1) = \mathbf{u}(k) + k_m \frac{e_m(k)}{|e_m(k)|}$, k_m, k_θ 为常数。易知 ${}^T\mathbf{R}(k+1)$ 在机器人基坐标系下可表示为

$${}^b\mathbf{R}(k+1) = {}^b\mathbf{r}(k) {}^T\mathbf{R}(k+1) {}^b\mathbf{r}(k)^{-1}$$

其中, ${}^b\mathbf{r}$ 为机器人工具坐标系相对基坐标系的旋转矩阵, 则 ${}^b\mathbf{T}(k+1) = {}^b\mathbf{R}(k+1) {}^b\mathbf{T}(k)$, ${}^b\mathbf{T}(k)$ 为机器人末端当前姿态矩阵, 将 ${}^b\mathbf{T}(k+1)$ 代入运动学逆解可得到期望姿态的机器人关节角位移值, 由位置跟踪控制实现机器人末端期望姿态的调整。

3.3 模糊控制应用于机器人阻抗控制

根据 3.2 节给出的方法, 当机器人经过姿态调整达到期望姿态后, 可计算出接触面法向方向单位矢量 \mathbf{N} , 则机器人末端沿 \mathbf{N} 方向压力 $\mathbf{F}_n = FN$, F 为接触合力, 定义 $f_n = \|\mathbf{F}_n\|$, $f_d = \|\mathbf{F}_d\|$, 在阻抗控制式(式(1))中取 $\mathbf{M}_d = m_d \mathbf{I}^{3 \times 3}$, $\mathbf{B}_d = b_d \mathbf{I}^{3 \times 3}$, $\mathbf{K}_d = k_d \mathbf{I}^{3 \times 3}$, 其中, $\mathbf{I}^{3 \times 3}$ 为单位矩阵, 则得单一方向(\mathbf{N} 方向且与操作空间坐标系中某一坐标轴重合)上机器人阻抗控制满足:

$$e_f = m_d \ddot{e}_x + b_d \dot{e}_x + k_d e_x \quad (3)$$

其中, $e_x = x - x_d$, $e_f = f_n - f_d$ 分别表示 \mathbf{N} 方向上机器人末端的位移、接触力误差; m_d, b_d 和 k_d 分别表示系统在 \mathbf{N} 方向上期望的惯性参数、阻尼和刚度值; 对于任意方向上的阻抗控制, $\mathbf{M}_d, \mathbf{B}_d$ 和 \mathbf{K}_d 对角线上元素分别表示系统在操作空间各个自由度方向上的惯性参数、阻尼和刚度, 即根据 6 个类似式(3)的求解得到机器人沿任意方向上的力/位置控制参数。在机器人末端沿接触面滑动过程中, 环境的阻尼、刚度会变化, 且机器人在不同姿态时, 末端等效阻尼、刚度也不同, 因此, 需实时调整阻抗模型参数以适应环境变化, 机器人受力控制时, 运动速度慢, 仅需考虑调整参数(b_d, k_d)。

设计的机器人自适应阻抗控制如图 2 所示, DK、IK 分别为运动学正解和逆解, 末端工具重力补偿是在测量的合力 ${}^b\mathbf{F}_c(k)$ 中减去工具自重, 以提高接触力测量的准确性, ${}^b\mathbf{R}$ 为机器人工具坐标系到基坐标系的旋转矩阵, 模糊控制器(FLC)实

现期望阻抗模型参数(b_d, k_d) 的调整。先由测量结果估计出满足机器人整个工作空间稳定的力/位置控制, 参数(k_d, b_d) 值的范围为: $k_{\min} \leq k_d \leq k_{\max}, b_{\min} \leq b_d \leq b_{\max}$ 。然后定义 λ_b 和 λ_k 为系统阻尼、刚度修正因子, 取值(-1, 1), 定义系统阻尼参数调整表达式如下:

$$b_d(k+1) = \begin{cases} b_d(k) + \lambda_b(b_{\max} - b_d(k)) & \lambda_b \geq 0 \\ b_d(k) + \lambda_b(b_d(k) - b_{\min}) & \lambda_b < 0 \end{cases} \quad (4)$$

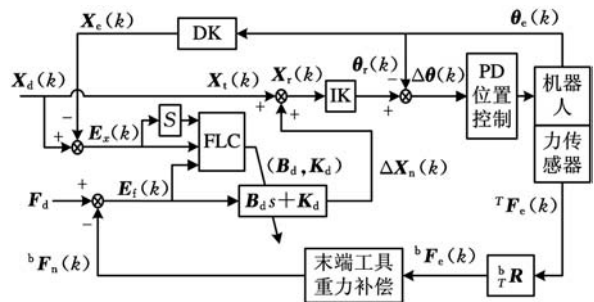


图 2 机器人力/位置阻抗控制框图

系统刚度参数调整表达式为

$$k_d(k+1) = \begin{cases} k_d(k) + \lambda_k(k_{\max} - k_d(k)) & \lambda_k \geq 0 \\ k_d(k) + \lambda_k(k_d(k) - k_{\min}) & \lambda_k < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots$$

其中, $b_d(k)$ 和 $k_d(k)$ 为前一控制周期中的系统阻尼、刚度值, $b_d(0)$ 和 $k_d(0)$ 取 3.1 节中计算的环境阻尼、刚度值。最后, 定义机器人末端当前位置与期望轨迹偏差为 e_x , 其变化率为 \dot{e}_x , 当前接触力与期望接触力误差为 e_f , 设计 FLC 实现以 e_x, e_f 为输入, 对 λ_k 的修改和以 \dot{e}_x, e_f 为输入, 对 λ_b 的修改; 将修改后的 λ_b, λ_k 分别带入式(4) 和式(5) 中实现对系统刚度 k_d 和阻尼 b_d 的调整。为提高控制系统随环境刚度、阻尼参数变化的自适应能力, 设计了具有模糊控制规则自调整的 FLC。以对 λ_k 的调整为例, 对应的模糊控制规则自调整解析式为

$$U = \left. \begin{aligned} & -\langle \alpha E_x + (1-\alpha) E_f \rangle \\ & \alpha(t+1) = \alpha(t) - \gamma S(e_x \cdot e_f) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$t = 1, 2, \dots$$

其中, 模糊输出 U 为 λ_k 对应的模糊量, t 为系统控制周期计数, E_x 和 E_f 为 e_x 和 e_f 对应的模糊量, $\langle x \rangle$ 表示取不小于 x 的最小整数, 自调整因子 $\alpha \in (0, 1)$, $S(x) = \begin{cases} 1 & \|x\| > 1 \\ x & \|x\| \leq 1 \end{cases}$, $\gamma = S(\frac{k_c}{k_0})$ 反映了当前环境刚度水平, 其中 k_c 为 3.1 节中得到的当前环境在 \mathbf{N} 方向上的刚度, k_0 为用户设定的刚度参考值。当环境刚度大时, 机器人与环境间力/位置控制过程中, E_f 较大, E_x 较小; 反之, 当环

境刚度较小时, E_x 较大、 E_f 较小; 当 $\|e_x \cdot e_f\| > 1$ 时, 认为系统处于振荡状态, 由式(3)知应增大系统参数 k_d 的值, $\|e_x \cdot e_f\|$ 值越小表示系统越稳定, k_d 调整量也应越小。当系统振荡大 ($\|e_x \cdot e_f\| > 1$) 时, 由式(6)得: 当环境 k_e 较大时, α 减小快, E_f 在 U 中占的权重较大, 由于 E_f 大、 E_x 小, 则 U 增大, λ_k 增大, 即实现增大系统参数 k_d , 系统振荡减弱; 当环境 k_e 较小时, α 减小慢, E_x 在 U 中权重较大, 由于 E_f 小、 E_x 大, 则 U 增大, λ_k 增大, 即也实现了增大系统参数 k_d , 系统振荡减弱。当系统振荡小 ($\|e_x \cdot e_f\| < 1$) 时, 类似以上分析得: α 、 U 和 λ_k 变化小, k_d 值变化小, 系统状态趋近稳定。若取 U 为 λ_b 对应的模糊量, E_x 和 E_f 为 \dot{e}_x 和 e_f 对应的模糊量, $\gamma = S(\frac{b_e}{b_0})$, b_e 为 3.1 节中得到的当前环境在 N 方向上的阻尼值, b_0 为用户设定的阻尼参考值。类似以上分析方法得: 式(6)可根据环境变化实现针对 λ_b 的模糊控制规则的自调整。

实际应用时, 在机器人力/位置实时控制过程中, 由力传感器采集的接触力、关节编码器测量的关节角位移计算 e_f 、 e_r 和 \dot{e}_r , 并代入式(6)修改 α 的值, 再根据模糊量化后的 \dot{e}_x 、 e_x 和 e_f 得到对应的 λ_k 、 λ_b 的模糊值, 将其乘以比例因子后得 λ_k 、 λ_b 的精确值, 将 λ_k 、 λ_b 代入式(4)和式(5)更新系统参数 (b_d 、 k_d), 将新的 (b_d 、 k_d) 代入式(3)得: 当前控制周期为满足期望的接触力 F_d 控制, 如图 2 所示, 机器人沿接触面法向 (N 方向) 上的位移需增加 $\Delta X_n(k)$, 将其作为位移补偿量加到期望轨迹 $X_d(k)$ 中得机器人参考轨迹 $X_r(k)$, 将 $X_r(k)$ 代入运动学逆解得机器人关节空间参考轨迹 $\theta_r(k)$, 在关节空间采用比例-微分(PD)实现位置控制。

4 实验及结果

利用实验室改造的 5 自由度工业机器人设计实验, 控制系统硬件平台为武汉华中数控 HNC-210B 控制器和 HSV-18 伺服驱动, 软件平台基于 DOS 系统, 位置控制周期为 4ms, 在机器人末端安装有 ATI Delta 力传感器(精度达 0.1N, 采样频率为 7kHz)和作为探针的铝制光滑圆棒。实验现场如图 3 所示, 将具有一定弹性、表面光滑的木板(表面为平面)以任意倾角(取约 70°)固定于墙壁



图 3 沿斜面力/位置控制实验图

上, 要求控制探针始终以期望姿态与木板平面接触并沿木板平面滑动, 为便于计算, 期望姿态取探针与木板平面垂直, 期望接触力沿木板法向方向, 大小为 2N, 木板平面切向运动则由控制面板上方向键控制。具体实验时, 先将机器人末端运动到与木板平面接近的位置, 然后启动接触力控制功能, 由于当前接触力小于期望值(2N), 机器人末端向木板运动直到接触力稳定为 2N, 在探针与木板接触过程中采用 RLS 算法估计环境参数 (b_e 、 k_e), 接触稳定后根据测量的接触力矩值(期望姿态下的接触力矩理论值为 0)调整探针姿态, 使探针与木板平面垂直, 同时, 根据各个关节角位移计算出当前接触点在机器人基坐标系下的坐标, 最后由手动操作控制面板上的方向键控制探针沿木板平面滑动; 相对基坐标系先沿 $-x$ 方向运动再沿 $+x$ 、 $-z$ 两方向同时运动, 系统速度设定为 20mm/s。

本实验中, e_x 、 \dot{e}_x 和 e_f 变化范围依次为 $[-0.1, 0.1]$ mm、 $[-100, 100]$ mm/s 和 $[-0.2, 0.2]$ N, e_x 、 \dot{e}_x 、 e_f 、 λ_b 和 λ_k 的论域都取 $\{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$, 在输入、输出论域各建立五个模糊子集, 其隶属函数为正态分布, 模糊控制规则由自调整因子 α 根据环境变化实时调整, 当 $\alpha=0.5$ 时模糊控制规则如表 1 所示。实验中力传感器采集的木板法向方向压力如图 4 所示(采样频率 250Hz), 接触稳定后木板法向方向压力与期望接触力的偏差在 $0 \sim 0.2$ N 范围内(运动方向突变会导致力波动); 由各个关节编码器的角位移计算探针在基坐标系 x 、 y 、 z 方向上的相对位移, 如图 5 所示, 各个方向位移变化平稳, 即探针沿木板平面滑动没有明显的颤抖, 由于木板平面不完全与机器人基坐标的 x 、 z 平面重合, 因此, 当沿 x 负方向移动时在 z 方向上有一定的位移。由于木板倾斜角是任意选取的, 实验结果表明设计的控制方法实现了机器人与任意倾斜面间的力/位置控制; 同时, 与文献[10]介绍的以力偏差为输入的模糊控制器修改参考轨迹的方法相比, 本文设计了具有控制规则自调整功能的模糊控制器, 实现了分别由机器人末端的位移、接触力误差调节系统刚度参数, 由位移误差变化率、接触力误差调节系统阻尼参数, 再根据调整后的系统阻尼、刚度参数由阻抗控制模型得到参考轨迹修正值, 克服了文献[10]中阻抗控制因为接触力测量值的剧烈变化而导致参考轨迹不平滑的缺点, 提高了机器人与环境接触过程中力/位置控制的稳定性。

表 1 模糊控制规则表($\alpha=0.5$)

| $\lambda_b(\lambda_k)$ | | e_f | | | | |
|------------------------|----|-------|----|----|----|----|
| | | NB | NS | ZE | PS | PB |
| e_x \dot{e}_x | NB | NB | NS | ZE | PS | PS |
| | NS | NS | NS | ZE | ZE | PS |
| | ZE | NS | ZE | ZE | ZE | PS |
| | PS | NS | ZE | ZE | PS | PS |
| | PB | NS | NS | PS | PS | PB |

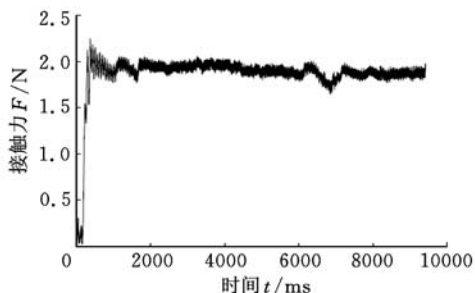


图 4 倾斜面法向接触力

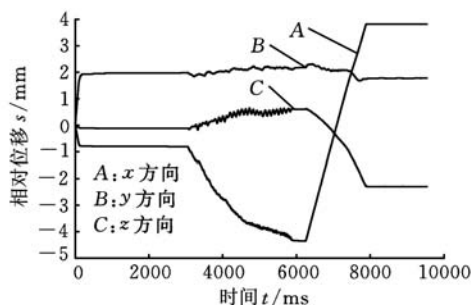


图 5 机器人末端(探针)在基坐标系下位移

5 结语

本文设计了自适应阻抗控制实现了机器人沿任意倾斜面的力/位置控制,解决了倾斜面法向方向未知以及环境阻尼、刚度未知影响机器人力/位置控制性能的问题,具有编程简单易于实现的优点。为减少接触面摩擦力对机器人末端姿态调整的影响,在机器人与环境初始接触稳定时,根据当前姿态下接触力矩调整机器人末端到期望姿态;在机器人沿倾斜面滑动过程中,设计具有规则自调整的模糊控制器,根据机器人末端位移误差及其变化率和接触力误差实时调整系统的阻尼、刚度参数,以减小环境参数未知对机器人阻抗控制性能的影响。

参考文献:

[1] Karayiannidis Y, Dougeri Z. An Adaptive Law for Slope Identification and Force/Position Regulation Using Motion Variables [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Orlando: IEEE, 2006: 3538-3543.

[2] Dougeri Z, Karayiannidis Y. Force/position Regulation for a Robot in Compliant Contact Using Adaptive Surface Slope Identification [J]. IEEE Trans. On Automatic Control, 2008, 53(9):2116-2122.

[3] Karayiannidis Y, Dougeri Z. Adaptive Control for Frictional Robot Contact Tasks on Uncertain Surface Slopes [C]//16th Mediterranean Conference on Control and Automation. Ajaccio: IEEE, 2008:932-937.

[4] Karayiannidis Y, Dougeri Z. Robot/Force Position Tracking on a Surface of Unknown Orientation [C]//European Robotics Symposium. Heidelberg: Springer, 2008:253-262.

[5] Olsson T, Bengtsson J, Johansson R. Force Control and Visual Servoing Using Planar Surface Identification [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington: IEEE, 2002: 4211-4216.

[6] Erickson D, Weber M, Sharf I. Contact Stiffness and Damping Estimation for Robotic Systems [J]. Int. J. Robot. Res., 2003, 22(1):41-57.

[7] Mallapragada V, Erol D, Sarkar N. A New Method of Force Control for Unknown Environments [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2006, 4(3):4509-4514.

[8] Hogan N. Impedance Control: an Approach to Manipulation: Part I - Theory, Part II - Implementation, Part III - Application [J]. ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control, 1985, 107(1):1-24.

[9] Calvelli T, Bona B. How to Cope with a Closed Industrial Robot Control: a Practical Implementation for a 6 - dof Articulated Robot [C]//SYROCO 2003. Wroclaw: IEEE, 2003:637-642.

[10] Hu Zhongxu, Bicker R, Marshall C. Position/force Control of Manipulator Based on Force Measurement and Its Application to Gear Deburring [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2003, 14:215-223.

(编辑 王艳丽)

作者简介:李正义,男,1980年生。华中科技大学机械科学与工程学院博士研究生。主要研究方向为机器人控制。发表论文 10 余篇。唐小琦,男,1957年生。华中科技大学机械科学与工程学院教授、博士研究生导师。熊 烁,男,1986年生。华中科技大学机械科学与工程学院硕士研究生。叶伯生,男,1966年生。华中科技大学机械科学与工程学院副教授。