

文章编号: 1000-582X(2013)06-018-08

模糊逻辑及神经网络动态摩擦和死区补偿的机器人滑模变控制

李 敏^{1,2}, 王家序¹, 肖 科¹, 秦 毅¹, 徐建春¹

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

摘 要: 针对机器人中存在非线性不确定性 LuGre 动态摩擦和非对称死区的问题, 提出采用模糊 RBF 神经网络及模糊逻辑分别对动态摩擦及死区进行补偿, 且实时、自适应训练非线性动态摩擦项及非对称死区项的参数, 实现对实际机器人系统准确再现的滑模变鲁棒控制算法, 并论证了该算法的 Lyapunov 稳定性。通过在 2 自由度机器人上的仿真, 证明该算法提高了机器人轨迹跟踪精度、控制力矩及摩擦力矩两者的稳定性。同时发现了该机器人控制力矩的脉冲式补偿误差、摩擦模型中存在类菱形吸引子、缺乏死区补偿将导致控制系统极限环振荡等非线性动力学现象, 以及死区逆模型中 ϵ 的估计对系统的精度有决定性作用。

关键词: 摩擦; 死区; 模糊神经网络; 滑模变控制; 李雅普诺夫函数

中图分类号: TP242.2

文献标志码: A

Sliding mode control of robot with dynamic friction and dead zone compensation using fuzzy logic and neural network

LI Min^{1,2}, WANG Jiaxu¹, XIAO Ke¹, QIN Yi¹, XU Jianchun¹

(1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Aiming to solve the problem of nonlinear uncertainties LuGre dynamic friction and non-symmetric dead zone in the robot, this paper presents a sliding mode robust robot control algorithm, compensates for the uncertainties of robot manipulator respectively LuGre dynamic friction with fuzzy radial base function (RBF) neural network and asymmetrical dead zone with fuzzy logic, trains parameters of nonlinear dynamic friction and asymmetrical dead zone real-timely and adaptively, to achieve an accurate reproduction of the actual robot system, and proves the Lyapunov stability of the algorithm. The simulation of a two-degree-of-freedom robot manipulator proves that the algorithm improves the trajectory tracking accuracy, the control torque stability and friction torque stability of the robot. Meanwhile, it is found that control moment pulse compensation error, rhombus attractor in the kinetic properties of the friction model of robot manipulator, and lacking of dead zone compensation cause nonlinear kinetic phenomena, such as limit cycle oscillation of control system. And the estimation of ϵ in the dead zone inverse model plays a decisive role in the accuracy of the system.

Key words: friction; dead zone; fuzzy neural networks; sliding mode control; Lyapunov function

收稿日期: 2013-01-15

基金项目: 国家自然科学基金重点、面上项目资助(50735008、50905189、50905191); 重庆市“百名杰出科技领军人才培养计划”项目, 重庆市“两江学者”计划专项经费资助, 重庆市科技攻关计划项目(CSTC, 2011AB3005)

作者简介: 李敏(1981-), 男, 博士研究生, 主要从事特种机电传动与智能控制、机器人精密驱动机构研究,

(Tel)023-65105721; (E-mail)liminfish008@163.com。

随着非线性、强耦合机器人对跟踪精度、稳定性、鲁棒性要求不断提高,机器人系统中的摩擦导致了关节的跟踪精度降低、黏滑运动以及极限环振荡加剧等问题,更严重的是当机器人低速重载运行时,摩擦甚至造成了 50% 的误差^[1-3]。而缺乏死区补偿,将增大机器人控制力矩和摩擦力矩的误差,导致大幅振荡,影响系统的动态响应。同时,负载、润滑、环境的改变及传动机构的温度、磨损量的变化将分别导致摩擦及死区的变化。因此,进行机器人摩擦力和死区补偿是非常有必要的。国内外众多学者开展了大量关于机器人摩擦补偿方法的研究^[2-4],但存在如下缺陷:1) 补偿效果由离线参数估计决定;2) 忽略了某些关键的摩擦特性;3) 摩擦模型中只有部分参数有更新算子;4) 把摩擦作为干扰,而未考虑摩擦的黏滑、stribeck 效应等重要特性。同样,关于死区的补偿方法主要有:模糊逻辑、神经网络、线性矩阵不等式增益的保性能控制、重复学习控制等^[5-8],这些方法同样存在不同程度的局限性,如文献[5-6]的神经网络补偿算法太过复杂,且不利于稳定性分析。文献[7]的算法收敛时间较长,而文献[8]所用算法的控制器增益较大。但很少有学者研究死区逆模型中期望力矩 $u_d=0$ 时其对应的带宽对机器人控制系统的影响。

具有并行计算推理、分布式信息存储和处理、自适应学习、强容错能力等众多优点的 RBF 神经网络,以及具有定性问题描述能力强、鲁棒性好、推理灵活等优点的模糊逻辑,特别适合于处理动态摩擦和死区这类不确定性、非线性问题,所以构造了基于

两者结构等价的模糊 RBF 神经网络,用于机器人摩擦力矩补偿,以及设计了模糊逻辑系统,用于死区补偿^[9]。此时,模糊神经网络的结构和权值都被赋予特定的物理含义,并可以基于先验知识及针对不同复杂程度的问题等设计出合适的模型。这样,就提高了机器人的学习速率,并实现了全局优化。

根据摩擦学的 3 个公理^[10]和 7 种重要典型摩擦模型^[2-3,11-15]及非对称非线性死区的特性,在对大量的摩擦和死区补偿方法比较后,同时结合机器人的动力学模型,提出了一种智能补偿机器人系统中的摩擦和死区不确定性的滑模控制算法,达到了机器人高精度、高可靠的控制要求,仿真结果表明该方法是有效的。

1 考虑动态摩擦和死区补偿的机械臂动力学模型及其控制结构

根据拉格朗日运动学,对自由度机器人建模为

$$D(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) + F(z, hz, \dot{q}) + \tau_d = \tau, \quad (1)$$

式中, $q, \dot{q}, \ddot{q} \in \mathbb{R}^n$ 分别为机器人各关节的位置、速度和加速度, $D(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 分别为对称正定惯性力矩、哥氏力及向心力矩,而 $G(q) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $F(z, hz, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $\tau_d \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 和 $\tau \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 则分别为重力矩、动态摩擦力矩、干扰力矩和控制力矩。针对式(1)的机械臂模型,文中采用的机器人控制框架如图 1 所示。

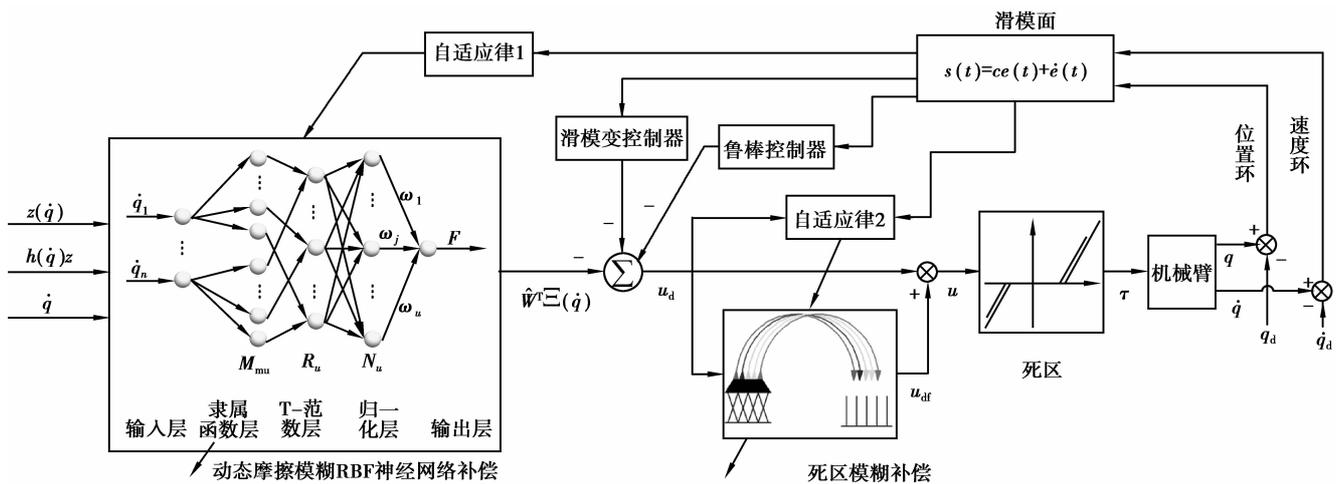


图 1 模糊 RBF 神经网络摩擦补偿和死区模糊补偿的机器人滑模变控制框架

机器人控制系统主要包括摩擦模糊神经网络整体补偿器、死区模糊补偿器、滑模控制器和鲁棒控制器。整个控制器的输入信号包括各关节的给定位置、速度、加速度,反馈信号包括各关节的位置和速度误差,输出信号包括绝对各关节的力矩、光栅编码

器的实际位置及速度,构成位置和速度 2 个闭环,达到机器人高精度、高可靠智能控制的目的。

在图 1 中,机械臂的未知干扰鲁棒项, $\tau_d = \mathbf{K}_s \text{sat}(s)$, $\mathbf{K}_{s_i} = \text{diag}(k_{s_i})$, $K_{s_i} > 0$, $i = 1, 2, \dots, n$, 取 $\delta > 0$, 则饱和函数设计为

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} 1 & s > \delta; \\ s/\delta & |s| \leq \delta; \\ -1 & s < -\delta. \end{cases} \quad (2)$$

1.1 机械臂控制系统的动态摩擦模糊 RBF 神经网络整体补偿

在机器人动力学模型式(1)中, F 为非线性动态摩擦项。根据文献分析可知, LuGre 模型是一个能对摩擦的各种重要特性进行准确描述的摩擦模型。虽然有学者通过实验手段获得了 LuGre 模型的参数^[3,16], 但其动态参数的准确辨识到目前为止仍然是一个难题。因此, 文中在前期 LuGre 摩擦参数实验方法辨识的研究基础之上^[3], 开展了用模糊 RBF 神经网络来逼近其动态参数(由实验获得)的研究。

而 LuGre 摩擦模型是根据鬃毛的平均变形, 即 z_i (关节 $i=1, 2, \dots, n$) 的微分来描述^[2-3,17], 表示为

$$\frac{dz_i}{dt} = \dot{q}_i - \frac{\sigma_{0i} |\dot{q}_i|}{g(\dot{q}_i)} z_i. \quad (3)$$

摩擦力由鬃毛的挠曲产生, 可以描述为

$$F_i = \sigma_{0i} z_i + \sigma_{1i} \dot{z}_i + \sigma_{2i} \dot{q}_i, \quad (4)$$

式中, σ_{0i} 、 σ_{1i} 和 σ_{2i} 分别是鬃毛的刚度、微观阻尼系数和黏性摩擦系数, Stribeck 效应由函数 $g(\dot{q}_i)$ 来描述

$$g(\dot{q}_i) = F_{ci} + (F_{si} - F_{ci}) e^{-|\dot{q}_i/\dot{q}_s|^2}, \quad (5)$$

式中 F_{ci} 、 F_{si} 分别为关节的库仑摩擦和黏性摩擦。

根据式(3)、(4)、(5), 可以得出

$$F = \sigma_{0i} z_i - \sigma_{3i} h_i(\dot{q}_i) z_i + \sigma_{4i} \dot{q}_i, \quad (6)$$

式中 $\sigma_{3i} = \sigma_{0i} \sigma_{1i}$, $\sigma_{4i} = \sigma_{1i} + \sigma_{2i}$, $h_i(\dot{q}_i) = \frac{|\dot{q}_i|}{g(\dot{q}_i)}$ 。

在机械臂系统中, 动态摩擦力矩 F 为未知, 可采用模糊 RBF 神经网络对 F 进行建模并估计^[3,18], 输入语言变量为 $z(\dot{q})$, $h(\dot{q})z(\dot{q})$, \dot{q} , 由神经网络和模糊逻辑的功能等价原理, 把隶属函数层和 T-范数层简化为单独的一层, 即模糊化层, 则得到 FNN 系统的输出为

$$F = \hat{F}(z(\dot{q}), h(\dot{q})z(\dot{q}), \dot{q}) + E_1 = \{\hat{W}\}^T \cdot \{\Xi(\dot{q})\} + E_1, \quad (7)$$

式中, \hat{W} 、 E_1 分别为模糊 RBF 神经网络权值 W 的估计值和整体逼近误差。

1.2 机械臂控制系统的非对称死区模糊补偿

由图 2 可知, 机械臂非对称非线性死区可表示为

$$\tau = D(u) = \begin{cases} m_1 u + m_1 c_1, & u \leq -c_1; \\ 0, & -c_1 \leq u \leq c_r; \\ m_r u - m_r c_r, & u \geq c_r. \end{cases} \quad (8)$$

式中, u 、 τ 分别为进入死区前、后的控制力矩。 m_1 、 m_r 、 c_1 、 c_r 都为大于 0 的死区参数。

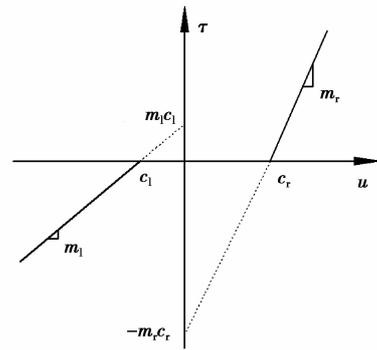


图 2 非对称非线性死区

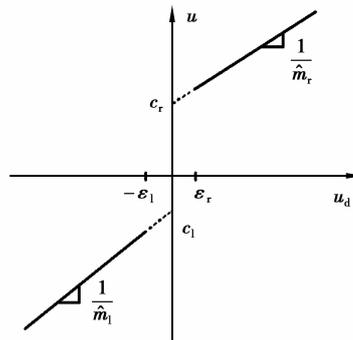


图 3 死区的逆的估计

由图 3 可知, 死区的逆的估计为

$$u = D^{-1}(u_d) = \begin{cases} \frac{u_d - \hat{m}_1 \hat{c}_1}{\hat{m}_1}, & u_d \leq -\epsilon_1; \\ 0, & -\epsilon_1 \leq u_d \leq \epsilon_r; \\ \frac{u_d + \hat{m}_r \hat{c}_r}{\hat{m}_r}, & u_d \geq \epsilon_r. \end{cases} \quad (9)$$

式中, u_d 为机械臂系统的期望控制输入, \hat{m}_1 、 \hat{m}_r 、 $\widehat{m_1 c_1}$ 、 $\widehat{m_r c_r}$ 分别为 m_1 、 m_r 、 c_1 、 c_r 、 $m_1 c_1$ 、 $m_r c_r$ 的估计。且 $\widehat{m_1 c_1} = \hat{m}_1 \hat{c}_1$, $\widehat{m_r c_r} = \hat{m}_r \hat{c}_r$, $\tilde{c}_r = c_r - \hat{c}_r$, $\tilde{c}_1 = c_1 - \hat{c}_1$, $\epsilon_1 = \hat{m}_1 \tilde{c}_1$, $\epsilon_r = \hat{m}_r \tilde{c}_r$ 均大于 0。

采用模糊补偿后的控制输入为

$$u = u_d + u_{dF}. \quad (10)$$

隶属函数设计为

$$\begin{cases} X_1(u_{di}) = \begin{cases} 0, & u_{di} > -\epsilon_1; \\ 1, & u_{di} \leq -\epsilon_1; \end{cases} \\ X_r(u_{di}) = \begin{cases} 0, & u_{di} < \epsilon_r; \\ 1, & u_{di} \geq \epsilon_r; \end{cases} \\ X_c(u_{di}) = (1 - X_1)(1 - X_r) = \begin{cases} 0, & u_{di} \leq -\epsilon_1, u_{di} \geq \epsilon_r; \\ 1, & -\epsilon_1 < u_{di} < \epsilon_r. \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

根据反模糊化方法, 并考虑到 $X_1 + X_r + X_c = 1$, 得模糊系统的输出为

$$u_{dF} = \left(\frac{u_d - \hat{m}_l \hat{c}_l}{\hat{m}_l} - u_d \right) X_l(u_d) + \left(\frac{u_d + \hat{m}_r \hat{c}_r}{\hat{m}_r} - u_d \right) X_r(u_d) - \mathbf{E}_d + \mathbf{E}_{21} + \mathbf{E}_{2r}, \quad (12)$$

式中, $\mathbf{E}_d = \epsilon_x X_c, \epsilon_x = u_d$ (此时, $|u_d| \leq \max(\epsilon_l, \epsilon_r)$), $\mathbf{E}_{21}, \mathbf{E}_{2r}$ 为死区的模糊补偿估计误差。根据式(8)~(12), 得死区后的控制输入为

$$\tau = u_d + [\{\Phi_l\}^T \{\hat{W}_l\}]^T X_l + [\{\Phi_r\}^T \{\hat{W}_r\}]^T X_r - \epsilon_x X_c + \mathbf{E}_{21} + \mathbf{E}_{2r}, \quad (13)$$

其中 $\Phi_l = \begin{bmatrix} \frac{u_{d1} - \widehat{m}_{l1} c_{l1}}{\widehat{m}_{l1}} & \dots & 0 \\ 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{u_{dn} - \widehat{m}_{ln} c_{ln}}{\widehat{m}_{ln}} \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix},$

$$\hat{W}_l = \begin{bmatrix} m_{l1} - \widehat{m}_{l1} & \dots & 0 \\ m_{l1} c_{l1} - \widehat{m}_{l1} c_{l1} & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & m_{ln} - \widehat{m}_{ln} \\ 0 & \dots & m_{ln} c_{ln} - \widehat{m}_{ln} c_{ln} \end{bmatrix},$$

$$\Phi_r = \begin{bmatrix} \frac{u_{d1} + \widehat{m}_{r1} c_{r1}}{\widehat{m}_{r1}} & \dots & 0 \\ 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{u_{dn} + \widehat{m}_{rn} c_{rn}}{\widehat{m}_{rn}} \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix},$$

$$\hat{W}_r = \begin{bmatrix} m_{r1} - \widehat{m}_{r1} & \dots & 0 \\ m_{r1} c_{r1} - \widehat{m}_{r1} c_{r1} & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & m_{rn} - \widehat{m}_{rn} \\ 0 & \dots & m_{rn} c_{rn} - \widehat{m}_{rn} c_{rn} \end{bmatrix}$$

为 $2n \times n$ 对角矩阵。

2 机械臂滑模变控制器的设计和稳定性分析

2.1 控制律的设计

设理想的位置及实际的位置指令分别为 q_d, q , 则跟踪误差定义为

$$e = q - q_d. \quad (14)$$

滑模函数设计为

$$s = e_2 - \Lambda e_1, \quad (15)$$

其中 Λ 为正定矩阵, $e_2 = \dot{e}, e_1 = -e$ 。

定义

$$\dot{q}_s = \dot{q}_d - \Lambda e. \quad (16)$$

死区补偿前的理想控制律设计为

$$u_d = \mathbf{D}(q) \ddot{q}_s + \mathbf{C}(q, \dot{q}) \dot{q}_s + \mathbf{G}(q) + \hat{\mathbf{F}}(z, hz, \dot{q}) - \mathbf{K}_D s, \quad (17)$$

其中 $\mathbf{K}_D = \text{diag}(K_i), K_i > 0$ 。

自适应律设计为

$$\begin{aligned} \dot{\hat{W}}_{fi} &= -\Gamma_{fi} \cdot \{\xi_{fi}(z(\dot{q}), hz(\dot{q}), \dot{q})\} s_i(k), \\ \dot{\hat{W}}_{li} &= \Gamma_{li} \cdot \{\varphi_{li}\} X_{li} s_i(k), \\ \dot{\hat{W}}_{ri} &= \Gamma_{ri} \cdot \{\varphi_{ri}\} X_{ri} s_i(k), \end{aligned} \quad (18)$$

其中 $\Gamma_{li}^{-1}, \Gamma_{ri}^{-1}, \Gamma_{fi}^{-1}$ 为对称正定矩阵。

2.2 稳定性分析

定义 Lyapunov 函数为

$$\begin{aligned} \mathbf{V} &= \frac{1}{2} s^T \mathbf{D} s + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \hat{W}_{fi}^T \Gamma_{fi}^{-1} \hat{W}_{fi} + \\ &\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \hat{W}_{li}^T \Gamma_{li}^{-1} \hat{W}_{li} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \hat{W}_{ri}^T \Gamma_{ri}^{-1} \hat{W}_{ri}, \end{aligned} \quad (19)$$

其中: $\hat{W}_{fi} = W_{fi} - \hat{W}_{fi}, \hat{W}_{li} = W_{li} - \hat{W}_{li}, \hat{W}_{ri} = W_{ri} - \hat{W}_{ri}$, 则

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}} &= s^T \left[\mathbf{D} \dot{s} + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{D}} s \right] + \sum_{i=1}^n \hat{W}_{fi}^T \Gamma_{fi}^{-1} \dot{\hat{W}}_{fi} + \\ &\sum_{i=1}^n \hat{W}_{li}^T \Gamma_{li}^{-1} \dot{\hat{W}}_{li} + \sum_{i=1}^n \hat{W}_{ri}^T \Gamma_{ri}^{-1} \dot{\hat{W}}_{ri}. \end{aligned} \quad (20)$$

根据 $\dot{\mathbf{D}}(q) - 2\mathbf{C}(q, \dot{q})$ 的斜对称特性, 且考虑到 $\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_d + \mathbf{K}_s \text{sat}(s) \geq |\mathbf{E}_{21} + \mathbf{E}_{2r}|$, 并把式(1)、(7)、(13)~(19)代入式(20)得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}} &= -s^T (\mathbf{K}_D s + \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_d + \mathbf{K}_s \text{sat}(s)) + \\ &s^T (\mathbf{E}_{21} + \mathbf{E}_{2r}) \leq 0. \end{aligned} \quad (21)$$

3 仿真结果及分析

根据二自由度机器人系统的动力学方程(1)式, 其中, $n=2$, 机器人各关节低、中、高速的位置指令分别为 $q_{d1} = 0.03 \cos t, q_{d2} = 0.03 \cos t, q_{d1} = -0.3 \cos t, q_{d2} = 0.3 \cos t, q_{d1} = -\cos t, q_{d2} = \cos t$ 。系统的初始条件, 低速为 $q_d(0) = [-0.03 \ 0.03]$ 或者 $[0 \ 0]$, 中速 $q_d(0) = [-0.03 \ 0.03]$, 高速 $q_d(0) = [-1 \ 1], z(0) = \dot{q}_d(0) = [0 \ 0]$, 控制器参数设计为 $\Lambda = 10I, \mathbf{K}_D = 30I, \mathbf{W} = 2I, \|\Gamma_{fi}\| = 0.00005, \|\Gamma_{li}\| = 0.00005, \|\Gamma_{ri}\| = 0.00005$ 。

$\Gamma_{li} = \|\Gamma_{ri}\| = 1000$, 其中神经网络摩擦补偿 F (\dot{q}) 的高斯基函数权值 W_f 初值为 0, 中心矢量 $c_i = 0.6 \text{ rand}(3,5)$, 宽度 $\sigma_i = 150 \text{ rand}(1,5)$, 死区模糊补偿的自适应律 W_1, W_r 初值为 0, 其斜率 $m_{11} = m_{r1} = m_{12} = m_{r2} = 1$, 宽度 $c_{11} = 19.345, c_{r1} = 21.385, c_{12} =$

$16.595, c_{r2} = 18.555$, 而 $\hat{m}_{11}(0) = \hat{m}_{r1}(0) = 1.05, \hat{m}_{12}(0) = \hat{m}_{r2}(0) = 0.95, \hat{c}_{11}(0) = 19.35, \hat{c}_{r1}(0) = 21.39, \hat{c}_{12}(0) = 16.59, \hat{c}_{r2}(0) = 18.55$, 机器人的动力学模型 $D-H$ 参数如(22)、(23)、(24)式及表 1 所示

$$M(q) = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)L_1^2 + m_2L_2^2 + 2m_2L_1L_2\cos(q_2) & m_2L_2^2 + m_2L_1L_2\cos(q_2) \\ m_2L_2^2 + m_2L_1L_2\cos(q_2) & m_2L_2^2 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_2L_1L_2\sin(q_2)\dot{q}_2 & -m_2L_1L_2\sin(q_2)(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ m_2L_1L_2\sin(q_2)\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)gL_1\cos(q_2) + m_2gL_2\cos(q_1 + q_2) \\ m_2gL_2\cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix}. \quad (24)$$

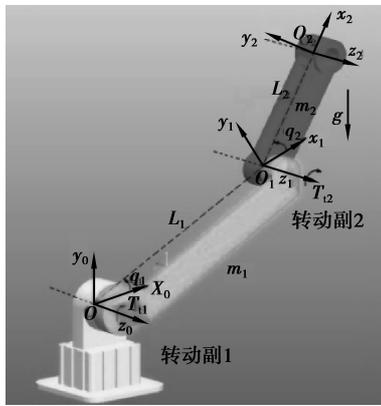


图 4 二关节机器人

表 1 机器人参数及其摩擦力参数

$m_1 /$ kg	$m_2 /$ kg	$L_1 /$ m	$L_2 /$ m	$\sigma_{01} /$ ($N \cdot m \cdot$ rad^{-1})	$\sigma_{02} /$ ($N \cdot m \cdot$ rad^{-1})
3.5	0.75	1	0.8	775	523

表 2 机器人参数及其摩擦力参数 $N \cdot ms \cdot rad^{-1}$

σ_{11}	σ_{12}	σ_{21}	σ_{22}
20.8	12	32	5

表 3 机器人参数及其摩擦力参数

$F_{s1} /$ ($N \cdot m$)	$F_{s2} /$ ($N \cdot m$)	$F_{c1} /$ ($N \cdot m$)	$F_{c2} /$ ($N \cdot m$)	$\dot{q}_{s1} /$ ($rad \cdot s^{-1}$)	$\dot{q}_{s2} /$ ($rad \cdot s^{-1}$)
25.1	20.4	20.7	17.6	0.13	0.08

图 5~图 14 反映了在是否有死区补偿的情况下, 二关节机器人的轨迹跟踪、摩擦力矩、控制力矩与时间的关系及摩擦力矩与速度的相图。

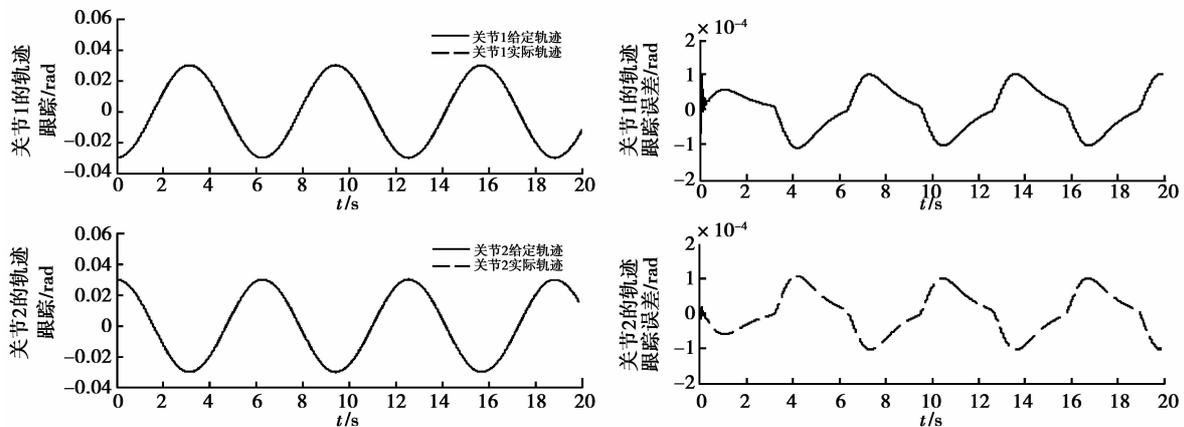


图 5 有摩擦和死区补偿时机器人轨迹跟踪及误差

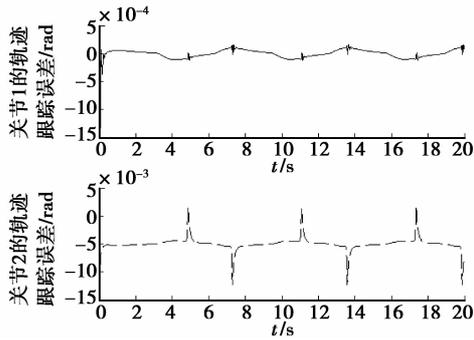


图6 无死区补偿时机器人轨迹跟踪误差

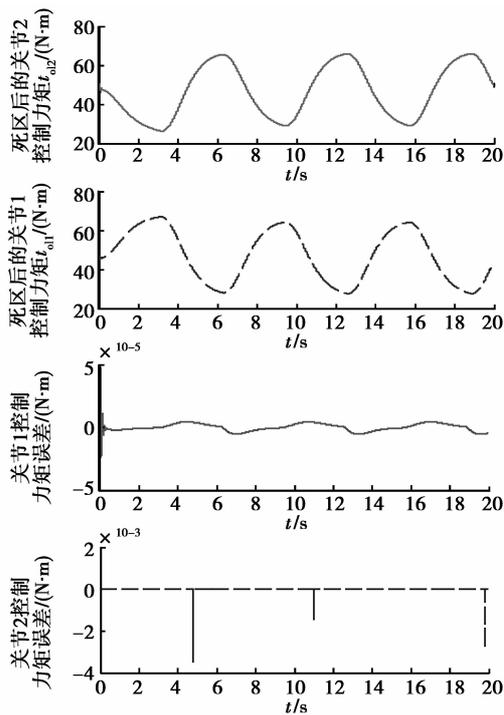


图7 有摩擦和死区补偿时机器人控制力矩及误差

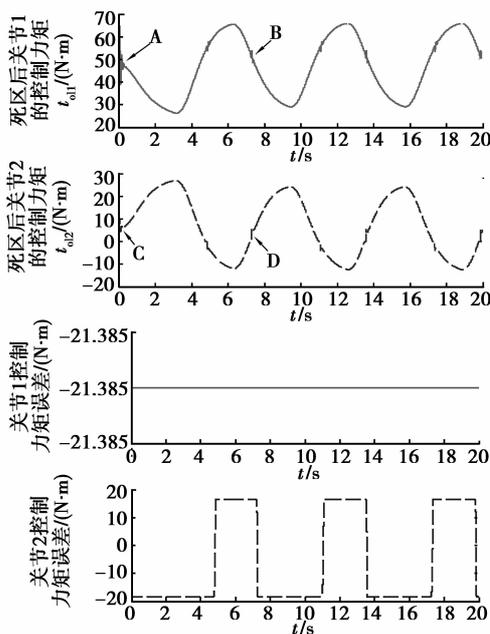


图8 无死区补偿时机器人控制力矩

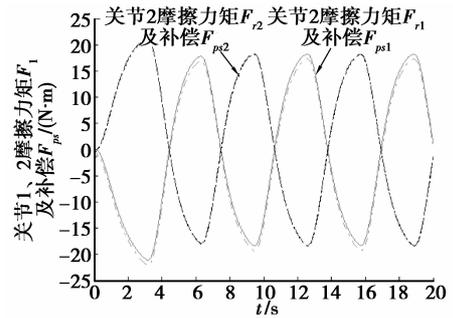


图9 机器人摩擦及补偿

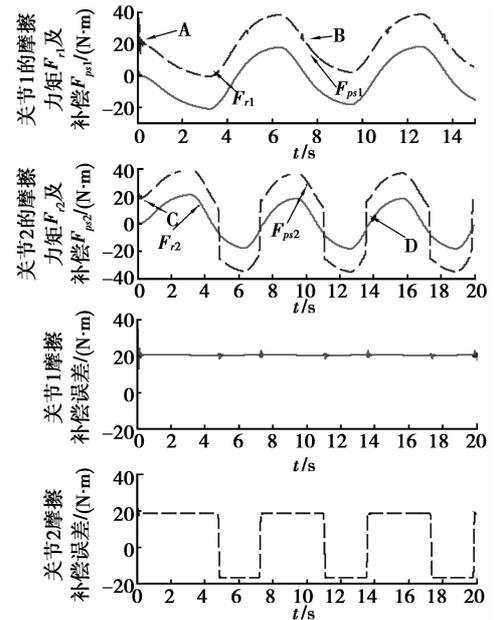
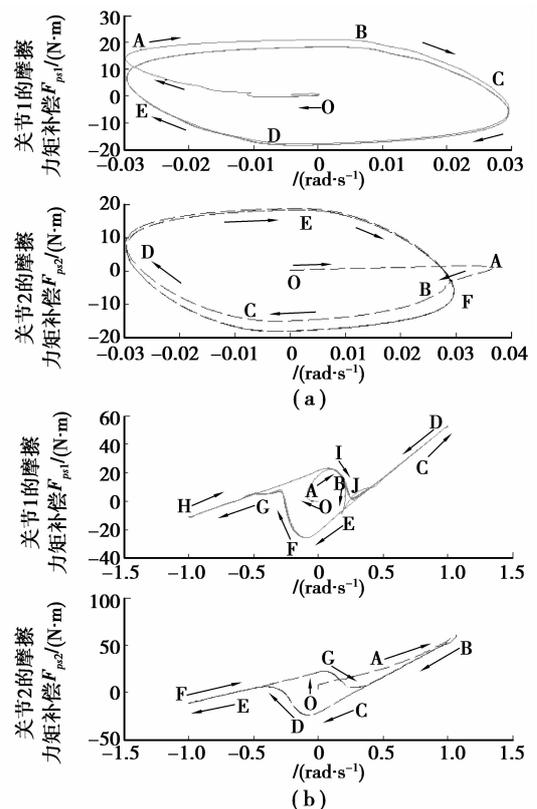


图10 机器人摩擦力矩(无死区补偿)



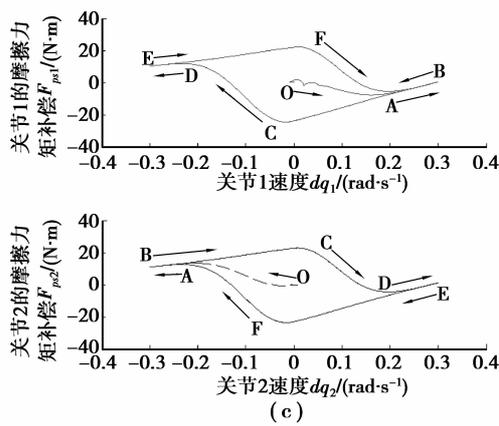


图 11 机器人摩擦模型

(a: $dq_1 = -0.03 \cos t, b:$

$dq_1 = -\cos t, c: dq_1 = -0.3 \cos t$)

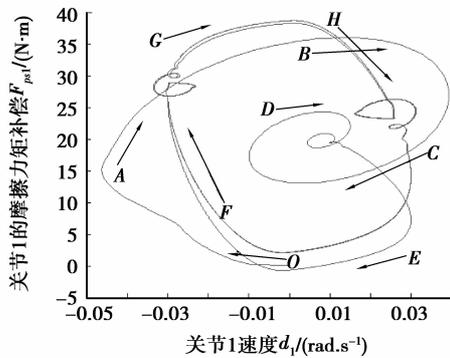


图 12 无死区补偿时第 1 关节摩擦模型

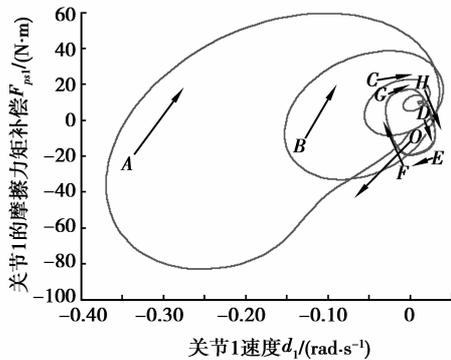


图 13 第 1 关节摩擦模型 ($q_{d1}(0)=0$)

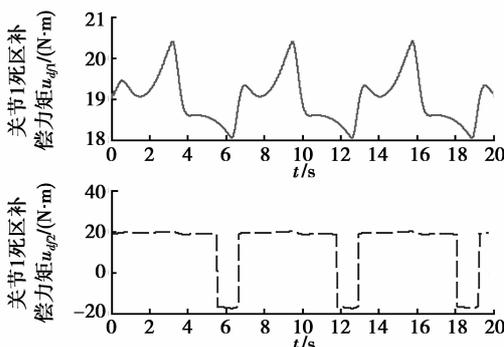


图 14 机器人死区补偿力矩

由图 5、图 7、图 9 可以看出,在有摩擦和死区补偿时,机器人关节 1 的轨迹跟踪精度较高,最大位置误差为 1.1016×10^{-4} rad;死区后的控制力矩 τ 与死区补偿前的期望控制力矩 u_d 误差小,最大力矩误差为 4.726×10^{-5} N·m,当然,可以通过增大死区自适应律的参数 Γ_{τ} , Γ_{u_d} 来提高控制力矩精度,但此时伴随出现的间断脉冲式力矩增大或减小,将对机械臂控制系统的稳定造成不利影响,因此需统一协调控制力矩精度与其稳定性之间的矛盾;动态摩擦力矩的补偿效果也很好,稳定状态最大误差为 -1.1133 N·m。同样地,关节 2 也将出现类似的规律。

由图 6 可以看出,无死区补偿时,关节 1 的轨迹跟踪精度在启动时和死区附近将降低,最大跟踪误差为 -1.3335×10^{-3} rad,并将产生不间断脉冲式抖振。

由图 8 可以看出,无死区补偿时,关节 1 的控制力矩将首先在“零”力矩附近(A)及力矩方向发生改变处(B)产生振荡,且关节 2 的振荡也在一定程度上对关节 1 的振荡存在着激励的作用,且此时最大力矩误差为 21.385 N·m,占总的控制力矩的 32.43%。同样地,关节 2 也存在力矩振荡。

由图 10 可以看出,无死区补偿时,关节 1 的摩擦力矩将主要在由快速增大或减小的过程过渡到向力矩慢速逐渐增大或减小的交点处(A, B)发生振荡,且关节 2 的振荡也在一定程度上对关节 1 的振荡存在着激励的作用;且此时的摩擦补偿误差较大,最大为 34.3585 N·m,是稳态时摩擦力矩幅值 -21.4175 的 1.63 倍。与关节 1 比较,关节 2 存在类似的规律。

图 11(a)、图 12、图 13 是低速运行时,机器人摩擦力矩与速度的相图,达到稳态时类似于菱形。当机器人由启动状态 $O \rightarrow$ 平衡状态的运动过程,启动摩擦力矩出现了不同程度的波动,即机器人的初始位置、速度、加速度,对机器人的稳定性影响重大(图 13),特别是在无死区补偿时,其摩擦力矩将出现极限环振荡(图 12)。在初始位置为 $q_{d1(0)}=0$ 时,机器人的启动力矩震荡幅值较大,为 -83.0236 N·m,是稳态时最大幅值 -19.7836 N·m 的 4.1966 倍,经过一定时间后,摩擦力矩 F 与角速度 \dot{q} 之间形成菱形稳定吸引子。且由图 11(a)可以看出,关节 1 中两者的相图由 $D \rightarrow A$ 时,速度逐渐增大,而摩擦力矩幅值由正向最大 $\rightarrow 0 \rightarrow$ 负向某值,即其斜率为负,表现为 Stribeck 现象。

图 11(b)是高速运行时,机器人摩擦力矩与速度两者的相图,同样出现了 Stribeck 现象,且当第一关节速度 \dot{q}_1 由 $0.28 \rightarrow 1$ rad/s(A \rightarrow B)或者 $1 \rightarrow -0.058$ rad/s(B \rightarrow A \rightarrow C)时,摩擦力矩 F_p 与速度 \dot{q}_1 之间为线性关系,且力矩无振荡,因为此时 z_1 为常量,则 $\dot{z}_1=0$,并得出式(5)中的 $g(\dot{q}_i)$ 也为常量,进而推导出式(6)中的 F_p 为 \dot{q}_1 的一阶线性函数,此时关节间

以黏性摩擦为主。同样地,关节以负向速度运动时,摩擦力矩与速度两者之间也为线性关系,如相图中 $D \rightarrow E \rightarrow F$ 所示。图 11(c)是机器人中速运行的摩擦力矩与速度相图,其运行规律与高、低速时类似。

机器人中速运行时死区补偿力矩 u_{dF} 随时间变化的关系,如图 14 所示,其波峰或者波谷的形状与死区的斜率 $\hat{m}_l(0)$ 或者 $\hat{m}_r(0)$ 有较大的关系,当斜率大于 1 时,往内凹,小于 1 时,往外凸,等于 1 时,呈现水平,根据公式(12)可以得出该结论。且 $|\epsilon_l|$ 、 $|\epsilon_r|$ 的值越小,特别是 $|\hat{m}_l(0)|$ 、 $|\hat{m}_r(0)|$ 的值越小,则轨迹的跟踪精度,控制力矩、摩擦和死区自适应补偿力矩的精度越高。除了以上共同点外,关节 2 的死区补偿力矩类似方波。

4 结 论

1)发现了该 2 自由度机器人摩擦力矩与速度的规律,即低速时,摩擦以 Stribeck 效应为主;高速时,以黏性摩擦为主;中速时则兼有两种效应;同时,机器人的启动速度过大将使其启动摩擦力矩出现较大震荡。发现了死区补偿力矩的规律和死区逆模型的估计准确度对机器人精度及控制系统稳定性发挥着至关重要的作用。

2)缺乏死区模糊补偿,降低了机器人控制精度及品质,引起了控制力矩、摩擦力矩的极限环振荡,影响了系统的稳定性。

参考文献:

- [1] Kermani M, Wong M, Patel R, et al. Friction compensation in low and high-reversal-velocity manipulators [C] // Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on, in Proc. ICRA '04, 2004 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, April 26-May 1, 2004, New Orleans, LA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2004, 5: 4320-4325.
- [2] 李敏,王家序,肖科,等. 基于模糊 RBF 神经网络动态摩擦分块补偿的机器人数字鲁棒滑模控制算法[J]. 中国机械工程, 2012, 23(23): 2792-2796.
- [3] 李敏. 滤波驱动机构不确定性补偿的机器人鲁棒滑模控制方法研究[D]. 重庆大学博士学位论文, 重庆: 2012.
- [4] Bona B, Indri M. Friction compensation in robotics: an overview [C] // Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference, December 12-15, 2005, Seville, Spain. Piscataway: IEEE Press, 2005: 4360-4367.
- [5] 李妍,毛志忠,王琰. 自适应动态径向基函数网络死区补偿控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(12): 1395-1400. LI Yan, MAO Zhizhong, WANG Yan. Compensation control for dead-zone by adaptive dynamic radial basis function network [J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(12): 1395-1400.

- [6] Lewis F L, Woo K T, Wang L Z, et al. Deadzone compensation in motion control systems using adaptive fuzzy logic control [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1999, 7(6): 731-742.
- [7] Xu J X, Viswanathan B. Adaptive robust iterative learning control with dead zone scheme [J]. Automatica, 2000, 36(1): 91-99.
- [8] Hiroaki M, Umeda T, Tanaka Y, et al. LMI-based additive gain for guaranteed cost control of robotic manipulator with deadzone [C] // Proceedings of the 2007 American Control Conference, July 9-13, 2007, New York, NY. Piscataway: IEEE Press, 2007: 4077-4082.
- [9] 田雨波. 混合神经网络技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [10] 谢友柏. 摩擦学系统的系统理论研究和建模 [J]. 摩擦学报, 2010, 30(1): 1-8. XIE Youbai. On the system theory and modeling of tribo-systems [J]. Tribology, 2010, 30(1): 1-8.
- [11] 刘丽兰,刘宏昭,吴子英,等. 机械系统中摩擦模型的研究进展 [J]. 力学进展, 2008, 38(2): 201-203. LIU Lilan, LIU Hongzhao, WU Ziyang, et al. An overview of friction models in mechanical systems [J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(2): 201-213.
- [12] Canudas D W C, Olsson H, Astrom K J, et al. A new model for control of systems with friction [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1995, 40(3): 419-425.
- [13] Armstrong-Hélouvy B, Dupont P, Canudas D W C. A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction [J]. Automatica, 1994, 30(7): 1038-1183.
- [14] Khayati K, Bigras P. A new model-based dynamic feedback control for systems with friction [C] // Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 7-10, 2007, Montreal, Quebec. Piscataway: IEEE Press, 2007: 2710-2715.
- [15] Hayward V, Armstrong B, Altpeter F, et al. Discrete-time elasto-plastic friction estimation [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(3): 688-696.
- [16] Kermani M R, Patel R V, Moallem M. Friction identification and compensation in robotic manipulators [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(6): 2346-2353.
- [17] Haessig D A, Jr., Flidland B. On the modeling and simulation of friction [J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1991, 113(3): 354-362.
- [18] 刘金琨. 机器人控制系统的设计与 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.