

液压外骨骼机器人非线性模糊滑模控制方法

陈庆诚¹ 朱世强² 蒋瑜¹ 刘松国³

(1.上海市特种设备监督检验技术研究院,上海 200062; 2.浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室,杭州 310027;
3.杭州市国家电子商务产品质量检测处置中心,杭州 310051)

摘要:针对液压外骨骼机器人系统建模困难的问题,提出一种利用自适应模糊逼近方法来实现对滑模等效控制的逼近,不需要对机器人的未知参数进行预先估计,同时设计可调参数的自适应调节律,增强系统的鲁棒性,引入一种类势能函数设计具有非线性积分项的滑模面,当误差较大时,积分效应适当减弱,防止产生较大的超调量;当误差较小时,积分效应适当增强,减小稳态误差。利用李雅普诺夫方法论证了该闭环控制系统的稳定性,并使用模糊切换方法来消除滑模控制抖振。最后,对液压助力外骨骼机器人系统进行轨迹跟踪及外干扰实验,结果验证了该方法的有效性,控制输出能快速平稳地跟随参考位置信号,且具有一定抗干扰能力。

关键词: 液压助力外骨骼机器人; 非线性滑模控制; 直接自适应模糊控制; 抖振

中图分类号: TP242.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)04-0355-07

Nonlinear Fuzzy SMC Algorithm for Hydraulic-driven Exoskeleton Robot System

CHEN Qingcheng¹ ZHU Shiqiang² JIANG Yu¹ LIU Songguo³

(1. Shanghai Institute of Special Equipment Inspection and Technical Research, Shanghai 200062, China

2. State Key Laboratory of Fluid Power and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

3. Hangzhou National Centre for E-commerce Product Quality Monitoring and Disposal, Hangzhou 310051, China)

Abstract: In case of the difficulty in modeling for exoskeleton robot, an adaptive fuzzy logic control was presented to directly approximate the equivalent control without estimating the unknown parameters in advance. And an adaptive law in controller was designed to adjust its parameters according to parameter changes of the control system. In order to decrease the steady-state error and prevent from the integrator windup, a new nonlinear saturation function derived from quasi-natural potential function was designed to improve the performance of traditional integral sliding mode control. When the error beyond a boundary layer, the integral action was restricted by adjusting factor to avoid the large overshoot and long adjustment time. When the error was small, the integral action was completed so as to reduce the steady-state error and improve the robustness. The stability of the proposed controller was proved by using Lyapunov method. Furthermore, the chattering of sliding mode control was alleviated by simplifying the fuzzy control instead of switching function without deteriorating the system reliability and robustness. Finally, without acknowledging the model parameters of hydraulic-driven exoskeleton robot system, experiments were implemented to demonstrate the robustness and effectiveness of the method. And the results showed that the control output can follow the reference position signal quickly and smoothly with anti-interference ability.

Key words: hydraulic-driven exoskeleton robot; nonlinear slide mode control; direct adaptive fuzzy logic control; chattering

引言

在机器人的运动控制中,通常需要考虑系统的

结构参数摄动及外部的干扰问题,主要体现为参数不确定性(摩擦参数变化、负载变化等)和非参数不确定性(建模误差、外界扰动等)^[1-3]。液压外骨骼

机器人由液压方式驱动,考虑到液压管路-伺服阀-油缸系统的复杂程度,其模型参数辨识困难,外部干扰等不确定因数较为复杂。滑模变结构控制对模型误差和外部干扰具有较好的鲁棒性,可以削弱由于数学模型不精确对系统控制性能造成的影响^[4-5]。

滑模变结构控制中的等效控制通常基于对象的动力学数学模型^[6-7],但机器人非线性系统的动力学方程形式复杂,且随着模型自由度的增长,参数辨识变得繁冗困难,无法建立准确的数学模型。且为了保证系统能够达到切换面,在设计控制律时通常要求系统不确定性范围的界已知,这个要求在实际工程中往往很难达到^[8]。因而,如何结合滑模控制的强鲁棒性优点,设计一种对模型依赖度低、实时性强、实现便捷的智能综合控制器具有重要的理论和工程意义。

针对一些难以建模或者模型参数无法精确估计的非线性系统可以利用模糊系统进行模糊逼近,直接利用模糊规则输出量来确定模糊控制量,取代滑模控制中的等效控制^[9]。为了取得更好的逼近效果,在模糊滑模控制中可以引入自适应控制思想,设计自适应控制律,不断学习被控对象的动态特性,给出合适的控制规则,使得系统更具有鲁棒性^[10-12]。

文献[13-17]只对控制对象的部分不确定项进行模糊逼近,具有一定的局限性。本文针对一种非线性液压驱动外骨骼机器人系统,在模型参数未知及不确定性情况下,引入类势能函数设计具有非线性积分项的滑模面,设计一种直接自适应模糊滑模控制算法(DAFSM),基于单输入的模糊控制策略直接对等效控制进行模糊逼近,同时对控制器相关参数进行自适应调整,一方面简化了模糊规则,便于控制器的实现,另一方面保证了跟踪精度同时防止系统超调,使得控制系统得到全局稳定,最后对液压驱动外骨骼机器人进行跟随及抗干扰实验。

1 非线性滑模面设计

针对具有不确定性非线性机器人系统,一般来说,系统参数摄动是不可避免的。系统中参数矩阵可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{M}(\mathbf{q}) = \mathbf{M}_0(\mathbf{q}) + \Delta\mathbf{M}(\mathbf{q}) \\ \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{C}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \Delta\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \\ \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{G}_0(\mathbf{q}) + \Delta\mathbf{G}(\mathbf{q}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{M}_0(\mathbf{q})$ 、 $\mathbf{C}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 、 $\mathbf{G}_0(\mathbf{q})$ ——名义模型参数矩阵

$\Delta\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 、 $\Delta\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 、 $\Delta\mathbf{G}(\mathbf{q})$ ——模型误差

则机器人系统模型可以表示为

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}(t))\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) + \mathbf{G}(\mathbf{q}(t)) + \mathbf{F}(t) = \boldsymbol{\tau}(t) \quad (2)$$

其中 $\mathbf{F}(t) = \Delta\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \Delta\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \Delta\mathbf{G}(\mathbf{q}) - \mathbf{d}$
式中 $\mathbf{F}(t)$ ——系统的建模不确定性及随机干扰
 \mathbf{d} ——随机干扰

因此为了增强系统的鲁棒性及抗干扰性,减小稳态误差,积分滑模控制是较常采用的方法之一,传统的积分滑模面设计为^[18]

$$\mathbf{s}(t) = \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{c}\mathbf{e} + \boldsymbol{\beta} \int_0^t \mathbf{e}d\tau \quad (3)$$

其中 $\mathbf{c} = \text{diag}[c_1, c_2, \dots, c_n]$ ($c_i > 0$)

$\boldsymbol{\beta} = \text{diag}[\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n]$ ($\beta_i > 0$)

$$\mathbf{e} = \mathbf{q}^d - \mathbf{q} \quad \dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{q}}^d - \dot{\mathbf{q}}$$

式中 \mathbf{e} ——跟踪误差

\mathbf{q} ——各关节角实际输出轨迹, $\mathbf{q} \in \mathbf{R}^n$

\mathbf{q}^d ——期望输出轨迹, $\mathbf{q}^d \in \mathbf{R}^n$

控制目标是 $\mathbf{e} \rightarrow 0$ 。由于该滑模面采用了全程积分项,在大的初始误差条件下,会产生积分 Windup 效应,导致暂态性能恶化,尤其是执行器饱和时,甚至会使系统不稳定。因此,可以在传统滑模面积分项中引入非线性饱和项,在初始误差较大的情况下,通过调整增益因子减少积分项的作用,以防止出现较大的误差累积,在误差较小时保持一定的积分作用,用于减少稳态误差。

基于该思路,设计一种类势能函数,通过合理设计调节因子,使其满足该性质的要求。

参考文献[19],设计一种类势能函数 $\text{Sat}(\sigma \cdot x)$,其对 x 的一阶微分为

$$\frac{\partial \text{Sat}(\sigma \cdot x)}{\partial x} = \text{sat}(\sigma \cdot x)$$

式中 $\text{sat}(\sigma \cdot x)$ ——非线性饱和函数

σ ——调整因子

定理1:非线性函数 $\text{Sat}(\sigma \cdot x)$ 和 $\text{sat}(\sigma \cdot x)$ 满足以下特性:

(1) 如果 $x = 0$,则 $\text{Sat}(\sigma \cdot x) = 0$;否则, $\text{Sat}(\sigma \cdot x) > 0$ 。

(2) $\text{Sat}(\sigma \cdot x)$ 二阶连续可导,且在 σ 调整因子确定的域值范围之内 $[f_{\min}(\sigma), f_{\max}(\sigma)]$, $\text{sat}(\sigma \cdot x)$ 为单调递增函数,即 $\frac{\partial \text{sat}(\sigma \cdot x)}{\partial x_i} > 0, \forall x_i \in [f_{\min}(\sigma), f_{\max}(\sigma)]$;在这个域值之外,则 $\text{sat}(\sigma \cdot x)$ 饱和,且均满足 $|\text{sat}(\sigma \cdot x)| \leq p$ 。

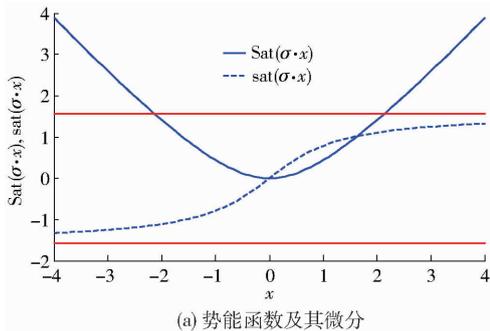
(3) $\forall x_i \in \mathbf{R}$,均有 $\text{sat}(\sigma \cdot x)x \geq 0$ 。当且仅当 $x = 0$ 时,有 $\text{sat}(\sigma \cdot x) = 0$ 。

基于以上特性及原则,设计一类势能函数,即

$$\text{sat}(\sigma \cdot x) = \text{atan}(\sigma \cdot x) \quad (4)$$

现已知其饱和函数,对其积分,可得另一类势能函数

$$\text{Sat}(\sigma \cdot x) = (\sigma \cdot x) \text{atan}(\sigma \cdot x) - \frac{1}{2} \ln(1 + (\sigma \cdot x)^2) \quad (5)$$



式(4)和式(5)的具体曲线如图 1 所示。

对照定理 1 的特性,得到该函数的详细特性为:

(1) $\forall x_i \in \mathbf{R}$, 均有 $\text{Sat}(\sigma \cdot x) > 0$ 。当且仅当 $x=0$ 时,有 $\text{Sat}(\sigma \cdot x) = 0$ 。

(2) $\forall x_i \in \mathbf{R}$, 不难证明, $\text{Sat}(\sigma \cdot x)$ 二阶连续可

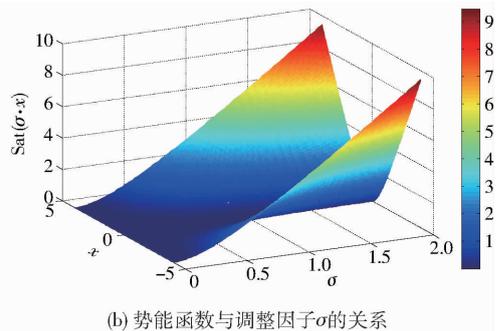


图 1 势能函数曲线

Fig. 1 Curves of quasi-natural potential function

导,且在调整因子 σ 确定的域值范围之内 $\left[-\frac{\sigma\pi}{2}, \frac{\sigma\pi}{2}\right]$, $\text{sat}(\sigma \cdot x) = \text{atan}(\sigma \cdot x)$, 为单调递增函数;在这个域值之外,则 $\text{atan}(\sigma \cdot x)$ 趋向于饱和,且均满足 $|\text{sat}(\sigma \cdot x)| \leq p$, 其中 $p = 1/\sigma$ 。

(3) $\forall x_i \in \mathbf{R}$, 均有 $\text{sat}(\sigma \cdot x)x \geq 0$ 。当且仅当 $x=0$ 时,有 $\text{sat}(\sigma \cdot x) = 0$ 。

即对于调整因子 σ 规定范围 $[f_{\min}(\sigma), f_{\max}(\sigma)]$ 内的 x 来说,饱和函数 $\text{sat}(\sigma \cdot x)$ 相比线性函数具有放大的作用,而对于调整因子 σ 规定范围以外的 x 值,饱和函数 $\text{sat}(\sigma \cdot x)$ 具有饱和限制的作用,该特性非常适用于实际物理控制器的抗饱和控制。

考虑到以上非线性积分滑模面的需求及渐近饱和的特性,设计了一种非线性积分滑模面,形式为

$$\begin{cases} \dot{s}(t) = \dot{e} + \mathbf{c}e + \beta \text{Sat}(\sigma \cdot e) \\ \text{Sat}(\sigma \cdot e) = \int_0^t \text{sat}(\sigma \cdot e) \\ \text{sat}(\sigma \cdot e) = \text{atan}(\sigma \cdot e) \end{cases} \quad (6)$$

传统积分滑模面中的积分项 $\beta \int_0^t e d\tau$ 可取代为 $\beta \int_0^t \text{sat}(\sigma \cdot e) d\tau$, 可以看出该积分项在调整因子 σ 的作用下,在误差 e 较大时, $\text{sat}(\sigma \cdot x)$ 饱和,可以使积分作用较小,避免对初始误差的累积,改善系统的响应性能,在调整因子设定的误差范围之外,引入积分作用,减少稳态误差,且该积分作用跟非线性饱和和积分函数有关。

2 模糊自适应控制算法设计

由滑模控制得知^[6],在模型参数及未知上界估计已知的情况下,滑模控制的等效控制律由 $\dot{s}(t) = 0$ 得

$$\tau^* = \mathbf{M}(\mathbf{c}\dot{e} + \beta \text{sat}(\sigma \cdot e) + \dot{q}^d) + \mathbf{C} + \mathbf{G} - \hat{\mathbf{F}} \quad (7)$$

但有些非线性系统存在建模困难,或者模型参数辨识不准确情况,基于精准数学模型的控制器的设计较为困难。因此,可以采用模糊逻辑控制器来直接得到控制输出。如图 2 所示,以滑模面变量 s 为模糊单输入变量,输出直接为等效控制输出 τ 。

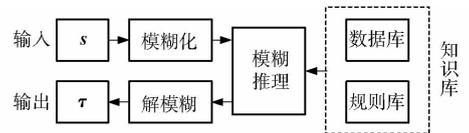


图 2 模糊滑模控制器框图

Fig. 2 Diagram of fuzzy SMC controller

直接模糊滑模控制器设计步骤如下:

(1) 变量模糊化。对输入变量 $s(t)$, 输出变量 τ , 模糊子集均定义为 {负大、负中、负小、零、正小、正中、正大}, 记为 {NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB}, 取其对应的模糊论域为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$, 将模糊论域乘以量化因子可变换到实际物理量的论域。由于滑模控制器在误差较小时的控制精度与输入量的敏感度相关,因此为了提高系统分辨率,对变量模糊化过程中采用如图 3 所示隶属度函数,进行偏心分布设计,语言值等级越低,其隶属度函数覆盖区域越窄,在提高精度同时也能更好地防止抖振的发生。在滑模面变量和误差较大时,为了保证系统的快速收敛特性,控制器输出参数设置缓慢变化。

(2) 规则库设计。本文中模糊推理策略选用 Mamdani 型。采用推理规则的形式为

$$\text{Ri: IF } s \text{ is } \dots, \text{ THEN } \tau \text{ is } \dots$$

采用乘积推理的方式进行规则的推理,且保证滑模满足条件 $\dot{V} = \dot{s}s < 0$, 根据控制经验,滑模面变量 $s(t)$ 的绝对值大小反映系统状态距离滑模切换

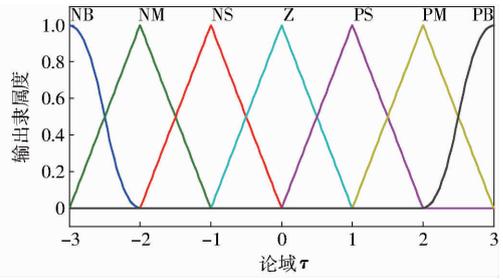
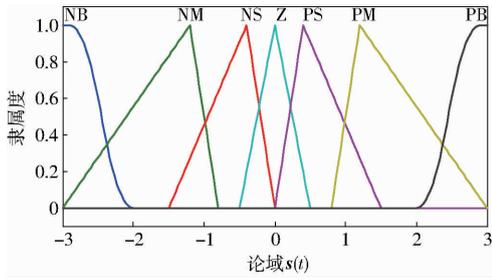


图 3 输入输出变量隶属函数

Fig. 3 MIMO membership function

面 $s(t) = 0$ 的远近,因此,模糊规则的具体制定主要依据以下原则:

当 $s(t)$ 较大时:说明此时状态误差 e 相应较大,因此滑模控制器需要有足够大的输出才能够保证滑模面以更快的速度收敛,同时保证一定的抗干扰性。

当 $s(t)$ 较小时:系统状态进入准滑动模态,状态误差 e 按指定状态收敛,合理设计控制器输出力矩,防止 $s(t)$ 在惯性的作用下频繁穿越滑模切换线 $s(t) = 0$ 激发抖振,同时也能使系统保持足够强的鲁棒性和快速性,有效减小稳态误差。

因此,具体的模糊规则为

R1:IF s is PB, THEN τ is NB

R2:IF s is PM, THEN τ is NM

R3:IF s is PS, THEN τ is NS

R4:IF s is ZO, THEN τ is ZO

R5:IF s is NS, THEN τ is PS

R6:IF s is NM, THEN τ is PM

R7:IF s is NB, THEN τ is PB

(3)解模糊。采用重心法解模糊,表达式为

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^7 \alpha_i \mu(i)}{\sum_{i=1}^7 \mu(i)} \quad (8)$$

式中 α_i ——模糊论域中的元素

$\mu(i)$ ——对应模糊子集的隶属度

得到的 τ 仍为模糊论域上的值,乘以量化因子后可以得到实际值。

为提高上述模糊控制的逼近精度,考虑几种智能控制算法的优点及操作的简便性,通过自适应控制对模糊规则的输出变量进行修正^[9]。对于具有误差干扰及不确定性的非线性系统来说,结合自适应控制方法能更有效地逼近等效控制,通过在线调节参数能够充分补偿被控对象的建模误差和干扰,增强系统的鲁棒性。通过设计自适应可调参数输出变量进行修正,取 α_i 为可调参数,则得

$$\tau(s, \alpha) = \alpha^T \xi \quad (9)$$

其中 $\alpha = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \dots]^T$ $\xi = [\xi_1 \quad \xi_2 \quad \dots]^T$

$$\xi_i = \frac{\mu(i)}{\sum_{i=1}^7 \mu(i)} \quad (10)$$

式中 ξ ——模糊基向量

根据模糊逼近理论^[20],存在一个最优模糊系统 $\tau(s, \alpha)$ 来逼近式(7)中的 τ^* ,取 ε 为逼近误差,且满足 $|\varepsilon| < E$,则有

$$\tau^* = \tau(s, \alpha) + \varepsilon = \alpha^T \xi + \varepsilon \quad (11)$$

则采用模糊系统 $\tau(s, \hat{\alpha})$ 来逼近 τ^*

$$\tau(s, \hat{\alpha}) = \hat{\alpha}^T \xi \quad (12)$$

其中

$$\tilde{\alpha} = \hat{\alpha} - \alpha$$

式中 $\hat{\alpha}$ —— α 的估计值

由于模糊系统存在逼近误差,特别是当模糊规则较少时会有较大的逼近误差,所以增加一个误差补偿控制项 τ_h ,用来补偿模糊控制 $\tau(s, \hat{\alpha})$ 与 $\tau^*(s)$ 之间的逼近误差,增加系统的稳定性和鲁棒性,则总的控制律设计为

$$\tau_{new}(s) = \tau(s, \hat{\alpha}) + \tau_h \quad (13)$$

由式(6)得

$$\dot{s}(t) = \ddot{e} + c\dot{e} + \beta \text{sat}(\sigma \cdot e) \quad (14)$$

结合控制律式(13)和(14)得

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= M^{-1}(\tau_{new}(s) - \tau^*(s)) = \\ &= M^{-1}(\tau(s, \hat{\alpha}) + \tau_h - \tau^*(s)) = \\ &= M^{-1}(\hat{\alpha}^T \xi + \tau_h - \varepsilon) \end{aligned} \quad (15)$$

定义李雅普诺夫函数为

$$V_1(s(t), \tilde{\alpha}) = \frac{1}{2}s^2(t) + \frac{M^{-1}}{2\eta} \tilde{\alpha}^T \tilde{\alpha} \quad (16)$$

式中 η ——大于零的正常数

结合式(15)和式(16),得

$$\begin{aligned} \dot{V}(s(t), \tilde{\alpha}) &= s(t)\dot{s}(t) + \frac{M^{-1}}{\eta} \tilde{\alpha}^T \dot{\tilde{\alpha}} = \\ &= s(t)M^{-1}(\tau(s, \hat{\alpha}) + \tau_h - \tau^*) + \frac{M^{-1}}{\eta} \tilde{\alpha}^T \dot{\tilde{\alpha}} = \\ &= s(t)M^{-1}(\tilde{\alpha}^T \xi + \tau_h - \varepsilon) + \frac{M^{-1}}{\eta} \tilde{\alpha}^T \dot{\tilde{\alpha}} = \\ &= \frac{M^{-1}}{\eta} \tilde{\alpha}^T \left(s(t)\xi + \frac{1}{\eta} \dot{\tilde{\alpha}} \right) + s(t)M^{-1}(\tau_h - \varepsilon) \end{aligned} \quad (17)$$

为达到 $\dot{V}_1(s(t), \tilde{\alpha}) \leq 0$,采用自适应控制律

$$\dot{\tilde{\alpha}} = \dot{\hat{\alpha}} = -\eta s(t)\xi \quad (18)$$

$$\tau_h = -K \text{sgn}(s(t)) \quad (19)$$

式中 η 为大于零的正常数, 切换增益 K 满足 $K = \max|\epsilon| + \mu, \mu > 0$, 即 $K > \max|\epsilon| = E$ 。

则式(17)变为

$$\begin{aligned} \dot{V}(s(t), \hat{\alpha}) &= -M^{-1}K|s(t)| - M^{-1}\epsilon s(t) \leq \\ & -M^{-1}E|s(t)| + M^{-1}|\epsilon||s(t)| = \\ & -M^{-1}(E - |\epsilon|)|s(t)| \end{aligned} \quad (20)$$

又因为 $|\epsilon| < E$, 则 $\dot{V}_1(s(t), \hat{\alpha}) \leq 0$ 得证, 则根据 LaSalle 不变性原理, $s(t)$ 会在有限时间内收敛到平衡点, 即当 $t \rightarrow \infty, s(t) \rightarrow 0$ 。

同样发现, 对于误差补偿控制的 τ_h 是一个与 $s(t)$ 有关的切换控制项, 为了系统的鲁棒性, 如果用固定的增益 K , 容易引起较大的抖振。因此, 对该项进行模糊化设计, 采用单输入模糊变量方法, 输入变量选择为 $\dot{V}(s(t), \hat{\alpha}) = s\dot{s}$, 输出变量为切换增益的变化量 ΔK , 则最终补偿切换项增益可估计为 $\hat{K}(t) = G \int_0^t \Delta K dt$ 。

根据 $\dot{V}_1(s(t), \hat{\alpha}) = s\dot{s} \leq 0$ 这个滑模可达条件

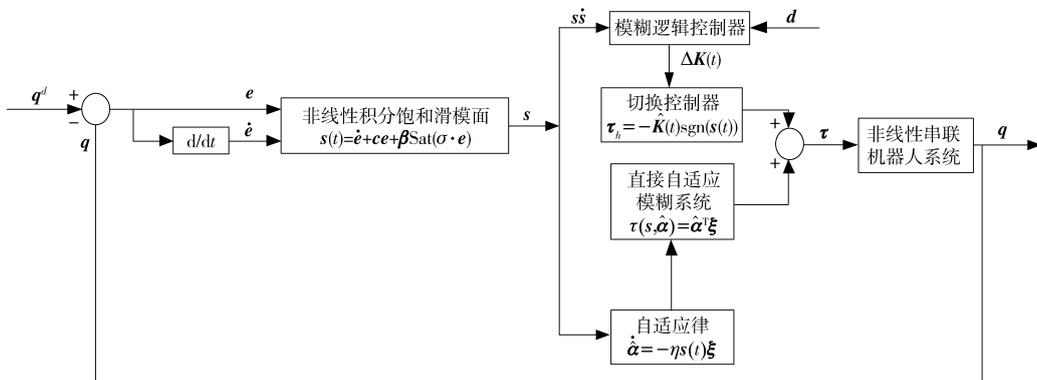


图 4 系统控制框图

Fig. 4 System control sketch

3 液压外骨骼机器人实验平台

液压助力外骨骼机器人结构如图 5 所示, 外骨骼的每条腿有 7 个自由度, 髋关节和踝关节处均有 3 个自由度, 膝关节处有 1 个自由度。其中, 髋关节和膝关节为主动自由度, 其余的自由度为被动自由度。

外骨骼的主动关节由液压阀控缸驱动, 控制系统由下位机嵌入式控制器与上位工控机组成。上位机主要负责控制策略执行和数据传输处理, 底层伺服驱动控制主要由下位机嵌入式控制器完成, 执行部件还包括伺服阀、伺服阀放大板、液压缸、编码器和压力传感器等, 编码器直接安装在转动关节的输出轴上, 将关节的角度位移反馈给控制器。

设计该模糊逻辑的模糊规则: 当 $s\dot{s} > 0$ 时, 逼近误差将变大, 系统状态将远离切换面 $s(t) = 0$, 系统不稳定, 切换项 \hat{K} 需要增大来补偿控制量, 即 ΔK 应该正大; 当 $s\dot{s} < 0$ 时, 李雅普诺夫稳定性判据, 系统处于稳定状态, 这时切换项 \hat{K} 可以适当减少, 以减少系统的抖振, 即 ΔK 应该负大; 当 $s\dot{s} \rightarrow 0$ 时, 系统将要收敛于平衡点, 这时切换项 \hat{K} 应该保持不变, 即 ΔK 应该为零。

因此具体模糊规则为

- R1: IF $s\dot{s}$ is PB, THEN ΔK is PB
- R2: IF $s\dot{s}$ is PM, THEN ΔK is PM
- R3: IF $s\dot{s}$ is PS, THEN ΔK is PS
- R4: IF $s\dot{s}$ is ZO, THEN ΔK is ZO
- R5: IF $s\dot{s}$ is NS, THEN ΔK is NS
- R6: IF $s\dot{s}$ is NM, THEN ΔK is NM
- R7: IF $s\dot{s}$ is NB, THEN ΔK is NB

最终, 同样采用重心法解模糊得到输出变量 ΔK , 最终模糊补偿切换项可估计为 $\hat{K}(t) = G \int_0^t \Delta K dt$ 。则自适应模糊滑模控制框如图 4 所示。

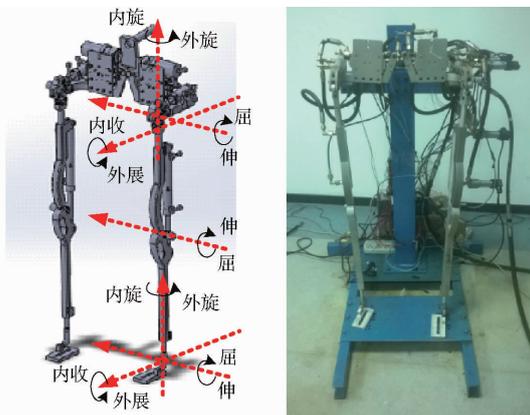


图 5 液压外骨骼实验台

Fig. 5 Test bench of hydraulic-driven exoskeleton robot

该机器人平台由液压方式驱动, 考虑到液压管路-伺服阀-油缸系统的复杂程度, 其模型参数辨识

困难,因此应用本文提出的基于单输入自适应模糊滑模控制进行轨迹跟踪实验,验证跟踪效果,并用于人体外骨骼的跟随及抗干扰实验。

4 对比实验与结果分析

4.1 单关节随动控制实验(无外干扰)

如图6所示,当外骨骼处于单脚悬空步态,即一类串联机器人结构时,考虑到伺服液压系统本身的非线性特性,以及液压系统参数辨识的复杂度等因素,采用本文提出的基于直接自适应模糊控制的控制算法(DAFSM)对膝关节上液压系统进行随动控制。

控制系统伺服周期是5ms,编码器精度为 0.15° ,采用本文的无模型控制算法,控制参数: $c = 12, \beta = 15$ 。自适应控制律式(18)参数: $\eta = 3$,初始值: $\hat{\alpha} = 3, \hat{K}(0) = 8$ 。且与传统的模糊PID算法(计

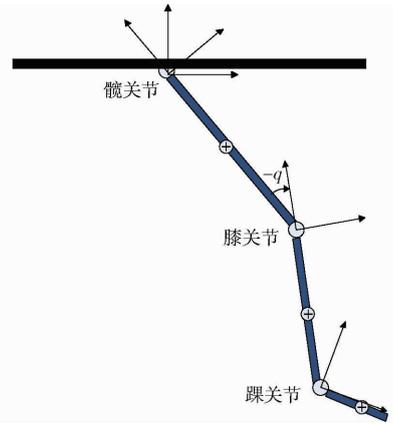


图6 单脚悬空

Fig.6 Single leg hanging

作FPID,下同)进行对比实验,在膝关节上进行正弦轨迹的跟踪实验,起始位置是 -50° ,幅值是 40° ,频率为1Hz,实验结果如图7和图8所示,且分别计算2个控制算法的性能指标,如表1所示。

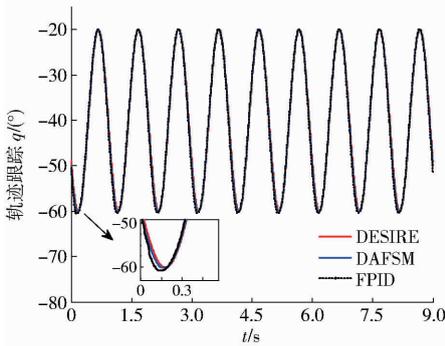


图7 膝关节的轨迹跟踪曲线

Fig.7 Trajectory tracking curves of knee joint

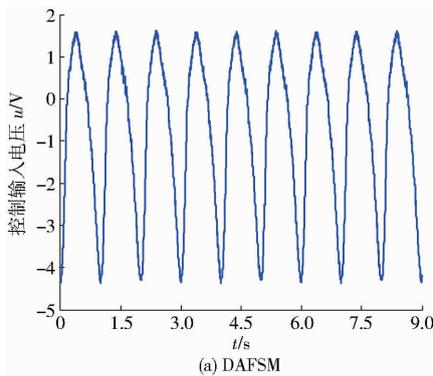
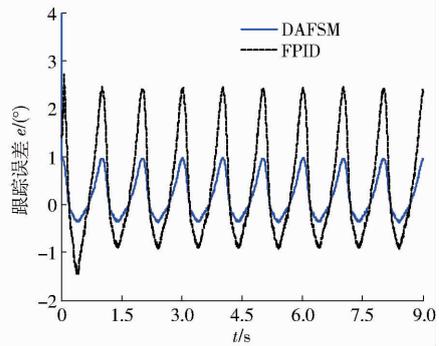


图8 膝关节的控制输入电压曲线

Fig.8 Input voltage curves of knee joint

表1 膝关节控制性能比较

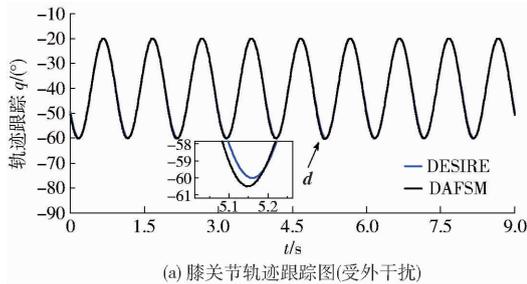
Tab.1 Control performance contrast

控制算法	平均跟踪误差 $\bar{e}/(^\circ)$	最大跟踪误差 $e_{max}/(^\circ)$	调整时间 t/s
DAFSM	0.785	1.285	0.218
FPID	1.45	2.478	0.511

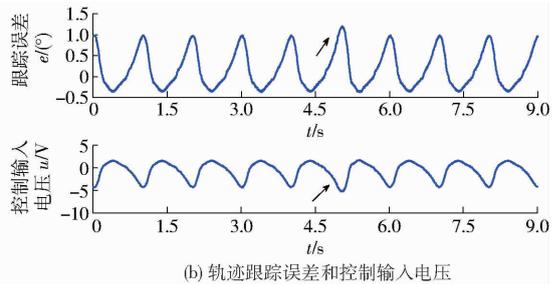
可见,对于非线性的液压伺服控制机器人系统,采用传统模糊PID的平均跟踪误差是本文算法的近

2倍,且在起始误差有一定的积累,最大误差也达到了本文算法的2倍。进一步,传统模糊PID为了保证跟踪精度,不断调整各个控制参数的论域范围,控制输出会造成系统较大的颤振,其动态性能受到一定的影响,根本原因是液压系统的非线性因素较为复杂,流量特性和负载特性都会对控制系统有一定影响,容易受到外在的干扰,因此采用传统模糊PID控制算法在保证控制精度的同时,势必会影响到控

制器性能乃至整个物理平台的稳定性和可靠性。而从实验效果可以看出,本文的控制算法能有效地跟踪正弦轨迹,平均误差只有近 0.8° ,而最大误差也在编码器分辨率的 9 倍左右,由于模糊控制对切换项的柔化,控制输出也较平稳,未出现明显的颤振现象,自适应模糊项的引入对非线性系统



(a) 膝关节轨迹跟踪图(受外干扰)



(b) 轨迹跟踪误差和控制输入电压

图 9 膝关节跟踪结果

Fig. 9 Tracking results of knee joint

从图 9a 可以看出,在 $5 \sim 5.2$ s 受干扰时,跟踪轨迹出现了一定的偏差,且从图 9b 中可以看出关节的跟踪误差在受干扰期间出现了一些波动,最大误差波动达到原有最大误差的 20% 左右,但从控制输入电压来看,输出信号没有太大的突变,在控制器饱和范围 $[-6 \text{ V}, 6 \text{ V}]$ 之内,且在短暂干扰之后,系统能迅速回归到正常运动水平,表明本文控制算法在外干扰下并未失稳,具有一定的抗干扰能力。分析认为,直接自适应滑模控制部分能对系统状态的变化进行跟踪,系统控制器参数能自适应调节,用以补偿机器人系统摩擦非线性、速度波动、外界干扰等因素,非线性滑模面也能对误差累积有一定的饱和限制作用,且模糊切换补偿项能对跟踪系统的不确定性进行有效估计,进一步增强系统的鲁棒性,达到更高精度、更平稳速度、更快响应速度跟踪期望轨迹的效果。

以上 2 个单关节实验结果表明,直接自适应模糊滑模控制在对系统的建模误差和不确定干扰完全未知的情况下,实现了控制系统的有效跟踪控制,并能减弱抖振的影响。且当增加一定干扰时,控制器

的不确定性及非线性因素具有较强的鲁棒性及系统稳定性。

4.2 单关节随动控制实验(外冲击)

为进一步验证本文方法的鲁棒性及抗干扰性,在 $5 \sim 5.2$ s 间给予一个 10 N 左右的外力冲击,检验系统在该情况下的跟踪情况,结果如图 9 所示。

增大了输出量以抑制更大干扰,表明系统能通过模糊补偿值来抑制外界干扰,具有良好的鲁棒性,因此该方法能有效适用于具有建模误差和不确定干扰的非线性机器人系统的轨迹跟踪控制。

5 结束语

采用自适应模糊系统对滑模控制的等效控制输出进行模糊逼近,并设计一种参数自适应调节律,在线调整参数,能根据系统的误差状态修正模糊滑模控制的输出,保证系统工作在最优或者接近最优的状态。同时,引入一种类势能函数设计具有非线性积分项的滑模面,当误差较大时,积分效应适当减弱,防止产生较大的超调量,保证系统的稳定性;当误差较小时,积分效应适当增强,减小稳态误差,以获得较高的控制精度,改善暂态性能。通过对液压驱动机器人系统进行实验验证,证明了该算法对系统的不确定性和外部干扰具有很好的鲁棒性,且通过模糊控制的柔化,在一定程度上减少了抖振现象,控制性能相比传统模糊 PID 算法有较大的改善和提高。

参 考 文 献

- 1 TORRES S, MÉNDEZ J A, ACOSTA L, et al. On improving the performance in robust controllers for robot manipulators with parametric disturbances[J]. Control Engineering Practice, 2007, 15(5): 557 - 566.
- 2 HUANG Chunqing, PENG Xiafu, WANG Junping. Robust nonlinear PID controllers for anti-windup design of robot manipulators with an uncertain Jacobian matrix[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(9): 1113 - 1121.
- 3 鲍晟, 冯勇, 孙黎霞. 非线性不确定系统的鲁棒滑模观测器设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(5): 613 - 616. BAO Sheng, FENG Yong, SUN Lixia. Robust sliding mode observer design of nonlinear uncertain systems[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(5): 613 - 616. (in Chinese)
- 4 YU X, KAYNAK O. Sliding-mode control with soft computing: a survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(9): 3275 - 3285.
- 5 ABDELHAMEED M M. Enhancement of sliding mode controller by fuzzy logic with application to robotic manipulators[J]. Mechatronics, 2005, 15(4): 439 - 458.

- IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, 2002, 7(4): 490 - 499.
- 10 WU J, GOLDFARB M, BARTH E. On the observability of pressure in a pneumatic servo actuator[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2005, 125(4): 921 - 924.
- 11 GULATI N, BARTH E J. A globally stable, load-independent pressure observer for the servo control of pneumatic actuators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2009, 14(3): 295 - 306.
- 12 SZABO T, BUCHHOLZ M, DIETMAYER K. A feedback linearization based observer for an electropneumatic clutch actuated by on/off solenoid valves [C]//2010 IEEE International Conference on Control Applications (CCA), 2010: 1445 - 1450.
- 13 LANGJORD H, KAASA G O, JOHANSEN T A. Nonlinear observer and parameter estimation for electropneumatic clutch actuator [C]//Proceedings of IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(14): 789 - 794.
- 14 LANGJORD H, KAASA G, JOHANSEN T A. Adaptive nonlinear observer for electropneumatic clutch actuator with position sensor[J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2012, 20(4): 1033 - 1040.
- 15 ASCHEMANN H, SCHINDELE D, PRABEL R. Observer-based control of an electro-pneumatic clutch using extended linearization techniques [C]//2012 17th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2012: 493 - 498.
- 16 钱鹏飞, 陶国良, 孟德远, 等. 电控气动离合器执行器滑模轨迹跟踪控制[J]. 浙江大学学报:工学版, 2014, 48(6): 1102 - 1106, 1113.
- QIAN P F, TAO G L, MENG D Y, et al. Sliding mode trajectory tracking control of electro-pneumatic clutch actuator[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2014, 48(6): 1102 - 1106, 1113. (in Chinese)
- 17 钱鹏飞, 陶国良, 孟德远, 等. 基于非线性模型的电气离合器执行系统位置伺服控制[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 1 - 6. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140301&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.001.
- QIAN P F, TAO G L, MENG D Y, et al. Nonlinear model-based position servo control of electro-pneumatic clutch actuator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 1 - 6. (in Chinese)
- 18 王积伟, 章宏甲, 黄谊. 液压与气压传动[M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 2005: 34 - 35.
- 19 BEATER P. Pneumatic drives-system design, modelling and control [M]. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- 20 QIAN P F, TAO G L, LIU H, et al. Globally stable pressure-observer-based servo control of an electropneumatic clutch actuator [J]. Proc. IMech E, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2015, 229(11): 1483 - 1493.

(上接第 361 页)

- 6 张昌凡, 王耀南. 滑模变结构的智能控制及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 27 - 29.
- ZHANG Changfan, WANG Yaonan. An intelligent control using sliding mode variable structure and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 27 - 29. (in Chinese)
- 7 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407 - 418.
- LIU Jinkun, SUN Fuchun. Research and development on theory and algorithms of sliding mode control[J]. Control Theory & Application, 2007, 24(3): 407 - 418. (in Chinese)
- 8 CHEN P, CHEN C, CHIANG W. Linear matrix inequality conditions of nonlinear systems by genetic algorithm-based H_{∞} adaptive fuzzy sliding mode controller[J]. Journal of Vibration and Control, 2011, 17(2): 163 - 173.
- 9 NEKOUKAR V, ERFANIAN A. Adaptive fuzzy terminal sliding mode control for a class of MIMO uncertain nonlinear systems[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2011, 179(1): 34 - 49.
- 10 LI H, YU J, HILTON C, et al. Adaptive sliding-mode control for nonlinear active suspension vehicle systems using T - S fuzzy approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3328 - 3338.
- 11 LI H, WANG J, LAM H K, et al. Adaptive sliding mode control for interval type-2 fuzzy systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2016, 46(12): 1654 - 1663.
- 12 SAGHAFINIA A, PING H W, UDDIN M N, et al. Adaptive fuzzy sliding-mode control into chattering-free IM drive[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(1): 692 - 701.
- 13 党进, 倪风雷, 刘业超, 等. 基于自适应模糊滑模的柔性机械臂控制[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2011, 43(2): 234 - 240.
- DANG Jin, NI Fenglei, LIU Yechao, et al. Adaptive fuzzy sliding mode control for flexible joint manipulators [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(2): 234 - 240. (in Chinese)
- 14 LIN F J, CHIU S L, SHYU K K. Novel sliding mode controller for synchronous motor drive[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(2): 532 - 542.
- 15 WHEELER G, SU C Y, STEPANENKO Y. A sliding mode controller with improved adaptation laws for the upper bounds on the norm of uncertainties[J]. Automatica, 1998, 34(12): 1657 - 1661.
- 16 LIN C M, MON Y J. Decoupling control by hierarchical fuzzy sliding-mode controller[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(4): 593 - 598.
- 17 CHEN J Y. Expert SMC-based fuzzy control with genetic algorithms[J]. Journal of the Franklin Institute, 1999, 336(4): 589 - 610.
- 18 EKER İ. Sliding mode control with PID sliding surface and experimental application to an electromechanical plant[J]. ISA Transactions, 2006, 45(1): 109 - 118.
- 19 SUN D, HU S, SHAO X, et al. Global stability of a saturated nonlinear PID controller for robot manipulators [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(4): 892 - 899.
- 20 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.