

文章编号: 1000-8152(2000)01-0073-06

不确定性操作臂的混合模糊 P + ID 控制的实验研究*

常晓光 李伟

(清华大学计算机系·北京·100084)

弗里德希·华尔

(德国布伦维克技术大学机器人与过程控制研究所·德国)

TP242

TP13

摘要: 提出了一种机械臂的混合模糊控制策略,它由一个增量模糊逻辑控制器和传统的积分-微分控制器构成,简称 Fuzzy P + ID 控制器.与传统的 PID 控制器相比,设计 Fuzzy P + ID 控制器时,只需多调节一个附加参数.我们应用 Fuzzy P + ID 控制器控制几何参数变化的两连杆机械臂 EDDA. EDDA 的阶跃和跟踪控制的实验结果表明: Fuzzy P + ID 控制器更有效和更鲁棒.

关键词: 机械臂; 增量式模糊逻辑控制器; 不确定性; Fuzzy P + ID 控制器

文献标识码: A

P+ID控制

模糊控制

Experiment Study of a Mechanical Manipulator under uncertainty by Hybrid Fuzzy P + ID Controllers

CHANG Xiaoguang and LI Wei

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing, 100084, P. R. China)

F. M. Wahl

(Institute für Robotics and Process Control, Technical University of Braunschweig, Germany)

Abstract: This paper presents a hybrid control scheme for the mechanical manipulator, which consists of a fuzzy logic proportional controller and a conventional integral and derivative one (Fuzzy P + ID). In comparison with the PID controller, only one additional parameter should be adjusted to tune the Fuzzy P + ID controller. The proposed control scheme is implemented to control a two-link manipulator-EDDA under geometrical parameters' changes. The experimental results on both of tracking and step control demonstrate the effectiveness and the robustness of the Fuzzy P + ID controller.

Key words: manipulators; the incremental fuzzy logic controller; uncertainty; fuzzy P + ID controller

1 简介 (Introduction)

传统的 PID 控制器结构简单、易于设计,广泛地应用于商业机械臂的关节控制系统.但是因为机械臂具有紧耦合、强非线性和参数不确定性等特点,所以 PID 控制器难于达到理想的控制性能.

文献[1,2]提出了一种机械臂的模糊逻辑控制器,仿真结果表明:对于摩擦和动力学参数不确定的机械臂,它的控制性能大大优于传统的 PID 控制器.在本文中,我们提出一种新的机械臂的混合模糊控制策略,它通过用一个增量式模糊逻辑控制器取代常规 PID 控制器中的比例控制项来构成,简称 Fuzzy P + ID 控制器.与已有的模糊逻辑控制器^[1~9]相比,它保持了 PID 控制器的结构简单和设计容易的特点.文献[11]指出,基于原 PID 控制器参数,设计

Fuzzy P + ID 控制器时,只需多调整一个附加参数.

本文中,我们用 Fuzzy P + ID 控制器控制两连杆机械臂 EDDA, EDDA 的阶跃和跟踪控制的实验结果表明:Fuzzy P + ID 控制器比传统的 PID 控制器,更有效、更鲁棒.

2 混合 Fuzzy P + ID 控制策略 (Hybrid Fuzzy P + ID control strategy)

由比例、积分和微分项组成的 PID 控制器如图 1(a),在机器人的关节控制系统中被广泛的采用.若机械臂的第 i 个关节变量记为 θ_i ,那么,在 PID 作用下,该关节的控制信号 $\Delta\tau_i$ 可表示为:

$$\Delta\tau_i(k) = K_{P_i}[e_i(k) - e_i(k-1)] + K_{I_i}Te_i(k) - K_{D_i}(\theta_i(k) - 2\theta_i(k-1) + \theta_i(k-2))/T. \quad (1)$$

* 基金项目:清华大学学术新人奖,德国洪堡基金会资助项目
收稿日期:1998-5-18;收修修改稿日期:1999-6-7.

式中, K_{P_i} , K_{I_i} 和 K_{D_i} 是控制器参数.

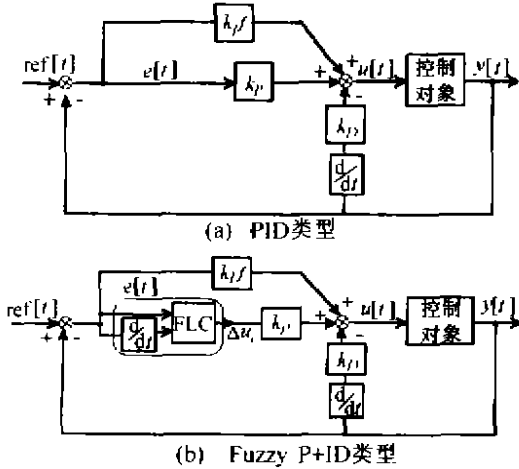


图 1 控制方案

Fig. 1 Control schemes

PID 控制器结构简单,设计容易,被广泛地应用于机械臂的控制,但是因为机械臂的动力学方程具有紧耦合、强非线性和不确定性等特点,所以采用 PID 控制器往往难达到理想的控制性能.为了改善机械臂的控制性能,而且保持 PID 控制器的简单的结构,我们提出一种混合 Fuzzy P+ID 控制器,该控制器由常规的积分控制(I)、微分控制项(D)和增量模糊逻辑控制器(Fuzzy P)构成,如图 1(b). Fuzzy P+ID 控制器不但继承了 PID 控制器的简单的结构,而且后续章节的实验结果将指出,由于模糊控制的引入,它显著地改善机械臂的控制性能. Fuzzy P+ID 控制器的离散增量表达为:

$$\Delta \tau_i(k) = \tau_i(k) - \tau_i(k-1) = K_{P_i} \Delta u_i(k) + K_{I_i} T e_i(k) - K_{D_i} (\theta_i(k) - 2\theta_i(k-1) + \theta_i(k-2)) / T.$$

模糊增量模糊逻辑控制器的输入信号,分别是误差信号 e 和误差变化 \dot{e} ,在本文中,我们为 e 和 \dot{e} 定义相似的隶属度函数,分别记为 (e, n, e, z, e, p) 和 $(\dot{e}, n, \dot{e}, z, \dot{e}, p)$,见图 2. 增量模糊逻辑控制器的模糊输出记为 Δu ,其隶属度函数为 $(o, n = -\epsilon, o, z = 0, o, p = \epsilon)$. 表 1 是增量模糊逻辑控制器的模糊规则库.如果我们采用惯常的“最大最小”推理方法^[10]和中心平均非模糊化方法^[7-9],增量模糊控制器的数学表达式是:

$$\Delta u(k) = \frac{\sum \text{输入的隶属度} \times \text{相应的输出}}{\sum \text{输入的隶属度}} \quad (3)$$

从图 2 我们发现,增量模糊逻辑控制器有 36 个模糊控制区域,因此,它的输出又可以表示为^[11]:

$$\Delta u(k) = \text{FLC}(e(k), \dot{e}(k)) = \{ \Delta u^{(1)}(k), \dots, \Delta u^{(i)}(k), \dots, \Delta u^{(36)}(k) \}, \quad (14)$$

式中, $\Delta u^{(i)}(k)$ 是第 i 个模糊分区的控制输出.基于隶属度函数和控制规则,我们可以推导出增量模糊逻辑控制器的计算公式^[11].在 $\Delta u(k)$ 中仅含有一个待调参数 ϵ ,调节 ϵ 可以获得不同的控制效果,文献 [11] 的研究指出,当控制信号 $e(k) > \epsilon$, Fuzzy P 控制器输出一个恒定的控制信号 $k_p \epsilon$; 当控制信号 $e(k) \approx 0$, Fuzzy P 控制器的输出为 $k_p e(k)$,这相当于一个积分控制器.

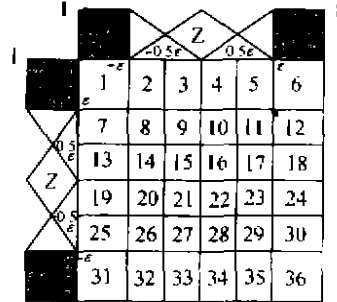


图 2 模糊控制器的隶属函数和控制区域
Fig. 2 Membership functions and combined control regions

表 1 模糊控制器的规则库

Table 1 Fuzzy rule base of the incremental fuzzy logic controller

$e(k)$	$\dot{e}(k)$		
	N	Z	P
N	M	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	P

3 机械臂-EDDA (Mechanical manipulator-EDDA)

我们将在二连杆机械臂 EDDA(图 3)上验证 Fuzzy P+ID 控制器的性能.该机械臂的动力学方程^[12]为:

$$\tau_1 = x_1 \ddot{\theta}_1 + 2l_1 \cos(\theta_2) x_4 \ddot{\theta}_1 + x_3 \ddot{\theta}_2 + l_1 \cos(\theta_2) x_4 \ddot{\theta}_2 + \text{sgn}(\dot{\theta}_1) x_5 + \dot{\theta}_1 x_7 + g \cos(\theta_1) x_2 + g \cos(\theta_1 + \theta_2) x_4 \quad (5)$$

$$\tau_2 = x_3 \ddot{\theta}_1 + l_1 \cos(\theta_2) x_4 \ddot{\theta}_1 + x_3 \ddot{\theta}_2 + \text{sgn}(\dot{\theta}_2) x_6 + \dot{\theta}_2 x_8 + g \cos(\theta_1) x_2 + g \cos(\theta_1 + \theta_2) x_4 \quad (6)$$

式中, θ_1 和 θ_2 是两个关节角变量, τ_1 和 τ_2 是关节驱动力矩, l_1 和 l_2 分别是臂 1 和 2 的长度, $(x_1, \dots, x_4, x_5, \dots, x_8)$ 分别是惯性参数, 库仑摩擦系数和粘滞

摩擦系数,文献[12]给出了它们的表达式:

$$\begin{cases} x_1 = I_{z1} + I_{z2} + l_1^2 m_2 = 3.1 \text{kg} \cdot \text{m}^2, \\ x_2 = l_1 m_2 + m_1 p_{c1} = 7.5 \text{kg} \cdot \text{m}^2, \\ x_3 = I_{z2} = 0.53 \text{kg} \cdot \text{m}^2, \\ x_4 = m_2 p_{c2} = 1.06 \text{kg} \cdot \text{m}, \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_5 = F_{c1} = 6 \text{Nm}, \\ x_6 = F_{c2} = 3 \text{Nm}, \\ x_7 = F_{v1} = 1 \text{Nm}, \\ x_8 = F_{v2} = 0.5 \text{Nm}. \end{cases} \quad (8)$$

应该指出,机械臂 EDDA 的动力学方程是很不确定的;首先,在 EDDA 的前臂,安装有一个可上下滑动的质量块,如果质量块上下滑动,机械臂的动力学行为将随之变化;其二,公式(8)只是对摩擦系数的近似的估计,摩擦系数并不确定,因此,EDDA 是一个验证控制器在不确定环境下的性能的很好的实验平台。

EDDA 的控制系统(图 3a)的硬件系统有:装有 Window NT 操作系统的奔腾计算机,电机电源、I/O 采集卡。

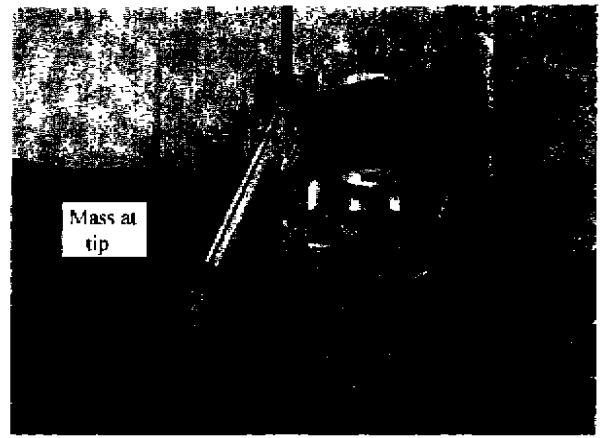
4 机械臂的控制(Control of manipulator)

4.1 阶跃控制(Step control)

在 EDDA 的阶跃控制实验中,我们采用超调量 M_p ,过渡时间 t_s ,稳态误差 e_∞ 三个指标描述系统的响应性能,超调量 M_p 通常定义为响应曲线的最大峰值误差,而过渡时间 t_s 则指响应曲线完全落在终值的 5% 的范围内的时间,对于一个稳定的系统, $t \rightarrow \infty$ 时,响应的稳态值与设定值的差值就是稳态误差 e_∞ 。这个性能指标是控制系统精度的量度。

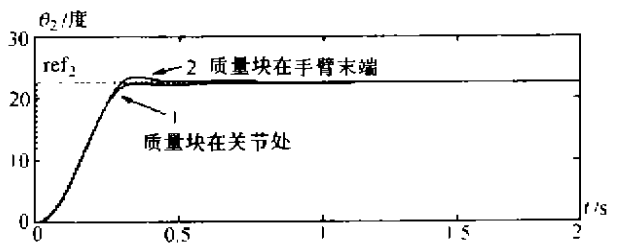
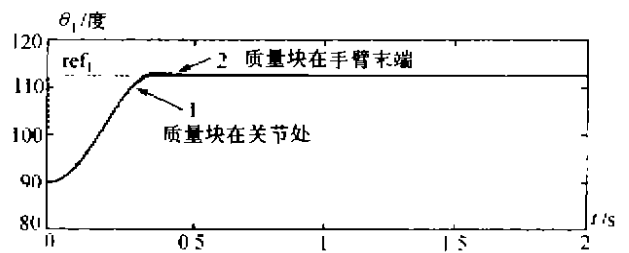
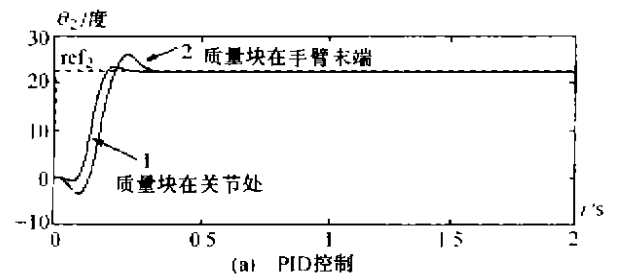
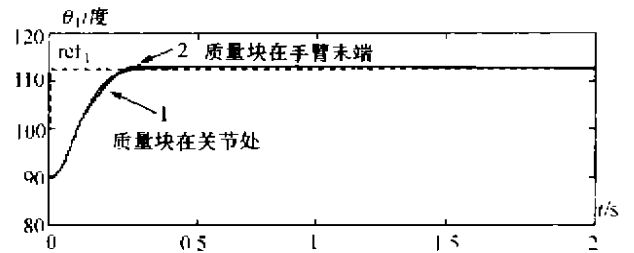


(a) EDDA 的控制系统



(b) 机械臂-EDDA

图 3 EDDA:直接电磁力驱动的机械臂
Fig. 3 a mechanical manipulator directly driven by the electromagnetic forces of motors



(b) Fuzzy P+ID 控制

图 4 质量参数变化时机械臂的阶跃控制
Fig. 4 Step control of the manipulator with mass change

实验中,关节角的初值 $\theta_1(0)$ 和 $\theta_2(0)$ 分别被设置为 90° 和 0° . 首先,把质量块固定在手臂的关节位置,我们分别整定 PID 控制器和 Fuzzy P + ID 控制器. 文献[12]的分析结果表明:较大的 ϵ 值有助于加快响应过程,而较小的 ϵ 值则可以减小系统的稳态误差. 根据这些准则,我们调整 Fuzzy P + ID 控制器的附加参数 ϵ , 改善控制性能. 图 4(a), (b) 中的曲线 1, 2 表示了分别在 PID 控制 ($K_{P1} = 2500, K_{I1} = 3, K_{D1} = 220; K_{P2} = 1364, K_{I2} = 0.2, K_{D2} = 50$) 和 Fuzzy P + ID ($K_{P1} = 17, K_{I1} = 22, K_{D1} = 220, \epsilon_1 = 0.5; K_{P2} = 5, K_{I2} = 7, K_{D2} = 50, \epsilon_1 = 0.53$) 控制下的实验结果,表 2 列出了它们的控制性能指标值. 可以看出, Fuzzy P + ID 控制器的超调量 ($M_{p(1)} = 0.0009^\circ, M_{p(2)} = 0.0084^\circ$) 小于 PID 控制器的超调量 ($M_{p(1)} = 0.4556^\circ, M_{p(2)} = 0.9946^\circ$), 而 PID 控制器

的过渡时间 ($t_{st(1)} = 0.2240s, t_{st(2)} = 0.1720s$) 比 Fuzzy P + ID 控制器 ($t_{st(1)} = 0.3140s, t_{st(2)} = 0.2920s$) 的过渡时间短,原因在于:PID 控制器的控制参数是按照关节力矩的极限值来调节的;而 Fuzzy P + ID 控制器的参数是根据理想的控制性能来调节的,为减少能耗,所产生的关节力矩远小于其极限值. Fuzzy P + ID 控制器的一个显著优点是大大减小了稳态误差. 实验结果表明:使用 Fuzzy P + ID 控制,关节角 1 和 2 的稳态误差分别为 $e_{\infty(1)} = -0.0267^\circ$ 和 $e_{\infty(2)} = 0.0384^\circ$. 而采用 PID 控制,关节角 1 和 2 的稳态误差分别为 $e_{\infty(1)} = -0.4145^\circ$ 和 $e_{\infty(2)} = -0.2229^\circ$, 可见, Fuzzy P + ID 控制精度提高了一个数量级,这是因为当控制信号很小时, Fuzzy P 控制器相当于一个积分控制器.

表 2 质量参数变化阶跃控制性能指标

Table 2 Step control performance specification with mass changes

		质量块在关节位置时					
$\theta_{ref1} = 112.4716^\circ$ $\theta_{ref2} = 22.5172^\circ$		过渡时间		超调量		稳态误差	
		关节 1	关节 2	关节 1	关节 2	关节 1	关节 2
PID		0.2240	0.1720	0.4556°	0.9946°	0.4145°	-0.2229°
模糊 P + ID		0.3140	0.2920	0.0009°	0.0084°	-0.0267°	0.0384°
		质量块在手臂末端时					
$\theta_{ref1} = 112.4716^\circ$ $\theta_{ref2} = 22.5172^\circ$		过渡时间		超调量		稳态误差	
		关节 1	关节 2	关节 1	关节 2	关节 1	关节 2
PID		0.2300	0.3020	0.6313°	3.523°	0.3911°	-0.3026°
模糊 P + ID		0.3100	0.2800	0.5991°	0.9555°	0.0290°	-0.0588°

当质量块从关节位置移向手臂的末端时,机械臂的转动惯量发生变化,此时 PID 控制和 Fuzzy P + ID 控制的响应曲线见图 4(a), (b), 显然, Fuzzy P + ID 控制器的响应性能优于 PID 控制器. 从表 2 也可以看到:采用 PID 控制器,第二个角关节响应曲线的超调量和过渡时间分别为 $M_{p(2)} = 3.523^\circ$ 和 $t_{s(2)} = 0.3020s$. 而采用 Fuzzy P + ID 控制,关节 2 的过渡时间几乎不变,而且超调量和稳态误差都很小,仍可以达到理想的控制性能.

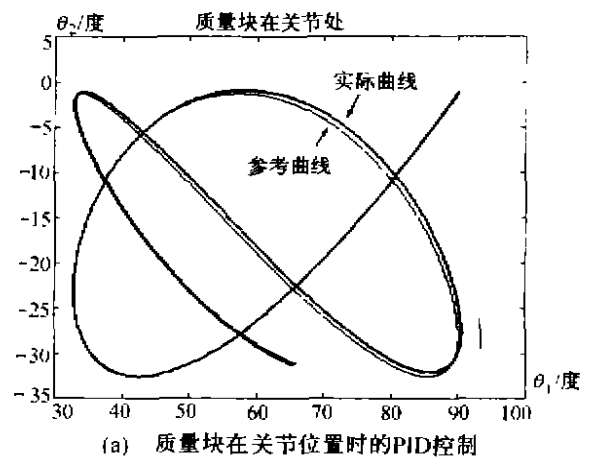
4.2 轨迹控制(Tracking control)

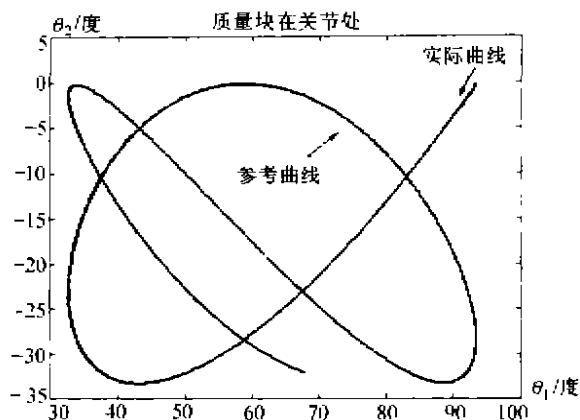
跟踪某一给定轨迹,是机械臂的另一个重要的操作. 在 EDDA 的轨迹控制实验中,我们选择以下参考轨迹.

$$\begin{cases} \theta_{ref1} = 1.07 + 0.5\cos(5.58t), \\ \theta_{ref2} = -0.2727 + 0.2727\cos(7.678t). \end{cases} \quad (9)$$

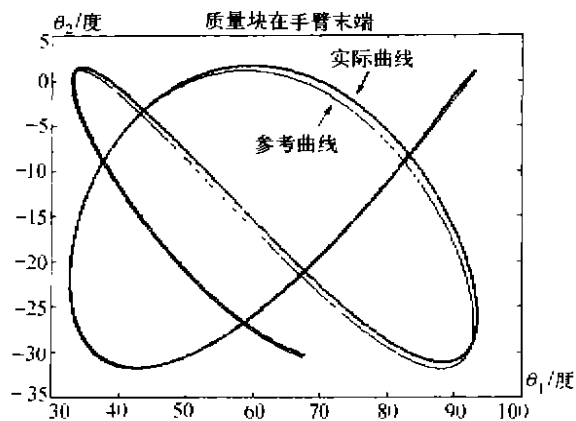
类似,首先把质量块移动到手臂的关节位置,我们分别讨论 Fuzzy P + ID 控制器和 PID 控制器的控

制性能. 在图 5(a), (b) 中,我们分别绘出参考轨迹、PID 和 Fuzzy P + ID 控制下,机械臂的实际运动轨迹. 应该指出的是,在传统的 PID 控制下,电机所产生的关节力矩已接近极限值,所以单纯调整 PID 控制器参数,难于进一步改善控制性能. 我们采用最大偏差 MD 和标准偏差 SD 两个指标描述系统的跟踪

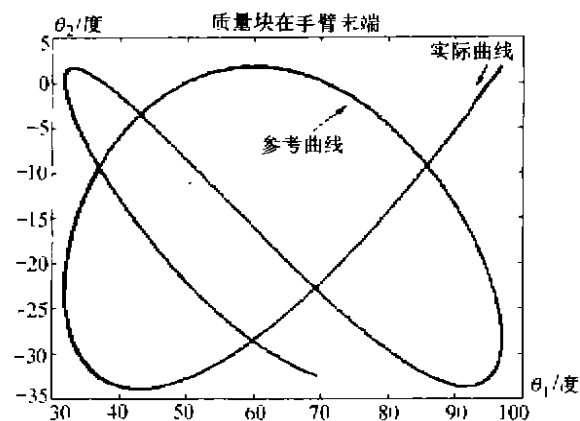




(b) 质量块在关节位置时 Fuzzy P+ID 控制



(c) 质量块在末端时的 PID 控制



(d) 质量块在末端时 Fuzzy P+ID 控制

图 5 质量参数变化时机械臂的跟踪控制

Fig. 5 Tracking control of the manipulator with mass changes

性能,见表 3. 采用 PID 控制,两个角关节的最大偏差为 $MD_{(1)} = 0.9771^\circ$ 和 $MD_{(2)} = 0.9077^\circ$, 相应的标准偏差分别为 $SD_{(1)} = 0.2642^\circ$ 和 $SD_{(2)} = 0.3127^\circ$; 而采用 Fuzzy P+ID 控制器,可以获得很好的跟踪性能,两个角关节的最大偏差和标准偏差分别为 ($MD_{(1)} = 0.4707^\circ$, $MD_{(2)} = 0.2377^\circ$) 和 ($SD_{(1)} = 0.1434^\circ$, $SD_{(2)} = 0.0568^\circ$).

把质量块移到手臂的末端,采用相同的 PID 和 Fuzzy P+ID 控制器重新实验,机械臂的实际运动轨

迹见图 5(c), (d). PID 控制下,两个角关节的最大偏差分别为 $MD_{(1)} = 1.1586^\circ$ 和 $MD_{(2)} = 1.4432^\circ$, 标准偏差为 $SD_{(1)} = 0.2998^\circ$ 和 $SD_{(2)} = 0.4468^\circ$; 而 Fuzzy P+ID 控制下,跟踪误差仍然很小,最大偏差分别为 $MD_{(1)} = 0.5433^\circ$, $MD_{(2)} = 0.6166^\circ$, 标准偏差为 $SD_{(1)} = 0.1603^\circ$, $SD_{(2)} = 0.1078^\circ$.

表 3 质量参数变化跟踪控制性能指标

Table 3 Tracking control performance specifications with mass changes

		最大偏差		标准偏差	
		关节 1	关节 2	关节 1	关节 2
质量块在上	PID	0.9771°	0.9077°	0.2642°	0.3127°
	Fuzzy P+ID	0.4707°	0.2377°	0.1434°	0.0568°
质量块在下	PID	1.1586°	1.4432°	0.2998°	0.4468°
	Fuzzy P+ID	0.5433°	0.6166°	0.1603°	0.1078°

5 结论 (Conclusions)

Fuzzy P+ID 控制器结构简单,易于整定,而且鲁棒,比常规 PID 控制器更有效. 这种 Fuzzy P+ID 控制器,具有与常规 PID 控制器相似的结构,易于推广到工业领域,替代常规的 PID 控制器,改善控制性能. 在实践中,我们还设计这种 Fuzzy P+ID 控制器控制工业锅炉,使锅炉燃烧系统的性能得到大大改善^[14].

参考文献 (References)

- [1] Li W and Janocha J. An efficient fuzzy control scheme for manipulator [J]. Chinese J. of Automation (English Edition), 1995, 7(3): 211-220
- [2] Li W. A method for design of a hybrid neuro-fuzzy control system based on behavior modelling [J]. IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 1997, (1): 128-137
- [3] Mamdani E H. Application of fuzzy algorithm for control of simple dynamic plant [A]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1974, 121: 1585-1588
- [4] Scharf E M and Mandic N J. The application of a fuzzy controller to the control of a multi-degree-freedom robot arm [A]. Industrial Application of Fuzzy Control [M]. 1985, 41-61
- [5] Braae M and Rutherford D A. Theoretical and linguistic aspects of the fuzzy logic controller [J]. Automatica, 1979, 15: 553-577
- [6] Tzafestas S and Papanikolopoulos N. Incremental fuzzy expert PID control [J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1990, 37(5): 365-371
- [7] Ying H, Siler W and Buckley JJ. Fuzzy control theory a nonlinear case [J]. Automatica, 1990, 26(3): 513-520
- [8] Malki H A, Li H D and Chen G. New design and stability analysis of fuzzy proportional-derivative control systems [J]. IEEE Trans. on

- Fuzzy Systems, 1994, 2(4): 245 - 254
- [9] Misir D, Malka H A and Chen G Design and analysis of fuzzy proportional-integral-derivative controller[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 79(3): 297 - 314
- [10] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8: 339 - 353
- [11] Li W Design of a hybrid fuzzy logic proportional plus conventional integral-derivative controller[J]. IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 1998, 6(4): 449 - 463
- [12] Kozłowski K and Pruter M Parameter identification of an experimental 2-link direct drive arm[A]. Proc. of the IASTED International Conference on Control and Robotics 'C', 1992, 313 - 316
- [13] Craig J J Introduction to Robotics Mechanics and Control[M]. Massachusetts: Addison-Wesley, 1986
- [14] Li W and Chang X G Application of hybrid fuzzy logic proportional plus conventional integral-derivative controller to combustion control of stoker-fired boilers[J]. Fuzzy Sets and Systems (in press)
- [15] Figueroa R J P de and Chen G Nonlinear Feedback Control System: An Operator Theory Approach[M]. New York: Academic Press, 1993
- [16] Desoer C A and Vidyasagar M. Feedback System: Input-Output Properties[M]. New York: Academic Press, 1975

本文作者简介

常晓光 1970年生,于1996年在中国科学院沈阳自动化所获得硕士学位,目前在清华大学计算机与技术系智能系统与技术国家重点实验室攻读博士学位,研究方向是计算智能,模糊建模和模糊控制,已在国内外发表学术论文近10篇。

李伟 1957年生,分别于1982和1984年在北方交通大学电气工程专业获得学士和硕士学位,于1991年在德国萨尔州大学电气工程系获得博士学位,1996年被清华大学计算机科学与技术系聘为教授,目前的研究兴趣是:机器人运动规划,基于行为的建模与控制技术,多传感器融合技术,模糊逻辑和遗传算法,图形模拟技术,在德国出版专著《Graphical Simulation and Collision Avoidance of Robots》,已在国内外发表学术论文70余篇,1995年获得中国博士后“国氏”奖励基金,1998年获得德国洪堡奖学金,是ASME,IEEE会员和中国电子学会高级会员。

全国高等院校机电自动化及机器人研究会第四届学术年会 征文通知

主办单位:全国高等院校机电自动化及机器人研究会

承办单位:西北工业大学

协办单位:北京机械工业自动化研究所、北京航空航天大学、中国机械工程学会机械工业自动化分会、中国自动化学会制造技术专业委员会、中国机械工程学会机械工业自动化分会青年工作委员会

时间:2000年8月

地点:陕西省西安市

一、征文内容:

· 机械制造的新理论与新方法; · 先进制造设备和仪器; · 故障诊断与修复新方法; · 制造系统中的多传感器融合技术及控制技术; · 机械制造虚拟现实技术; · 虚拟制造、敏捷制造和并行工程; · 绿色产品与清洁生产新方法; · 基于信息网络的机械制造技术; · 计算机集成制造的新发展及其应用; · 数控技术; · 超精密加工理论及技术; · 智能制造系统的建模与仿真; · 其它

· 机器人技术新发展及其应用; · 机器人运动学、动力学新理论及新方法; · 机器人控制新理论及新方法; · 机器人传感新技术及多传感器融合技术; · 机器人语言及编程新技术; · 机器人虚拟现实技术; · 机器人智能装配技术; · 机器人应用工程; · 非制造业机器人新发展; · 机电一体化理论及技术; · 机电控制与机器人教学成果及经验; · 其它

二、征文要求:

1) 文稿必须正式打印并寄到:100083,北京航空航天大学706教研室,周正干副教授,电话:82317706(O),82315054(H);传真:010-82316100;学会联系电话:(010)-62024309; 2) 每篇论文不超过6000字(含论文摘要和关键词); 3) 论文经评审后录用,录用通知另发。

三、论文出版:

本次会议论文的出版工作由中国机械工程学会机械工业自动化分会负责组织,录用论文将在《制造业自动化》杂志上以增刊形式出版。

四、关键日期:

1. 收稿截止日期:2000年4月底;

2. 录用通知日期:2000年5月底。

全国高等院校机电自动化及机器人研究会
中国机械工程学会机械工业自动化分会
1999年10月12日