

气动人工肌肉并联平台自适应模糊 CMAC 姿态跟踪控制

施光林¹ 沈 伟²

1. 上海交通大学, 上海, 200240 2. 上海海洋大学, 上海, 201306

摘要:着眼类机器人的腰部应用,设计了一种气动人工肌肉三自由度并联平台。引入一种自适应模糊 CMAC(AFCMAC),实现了并联平台的姿态控制。通过规划输入空间,实现了 AFCMAC 对迟滞力、气压波动等不确定因素和非线性耦合因素的感知。离散抗饱和 PID 并行监督和离线辨识避免了在控制运行初期出现较大的跟踪误差和气压波动,从而使 AFCMAC 的在线实时自学习调整成为可能。进行了定点转动姿态跟踪实验和抗干扰实验,实验结果表明,AFCMAC 具有较好的姿态控制性能和在线学习调整能力。

关键词:气动人工肌肉;三自由度并联平台;姿态控制;自适应模糊 CMAC;迟滞特性

中图分类号: TP13

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.02.011

Adaptive Fuzzy CMAC Position Tracking Control of Parallel Platform Based on Pneumatic Artificial Muscles

Shi Guanglin¹ Shen Wei²

1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240 2. Shanghai Ocean University, Shanghai, 201306

Abstract: Aiming at the waist of hominoid robot, this paper raised a 3 DOF parallel platform based on pneumatic artificial muscles. And an AFCMAC was introduced for posture tracking control of the parallel platform. By arranging the input space, AFCMAC could learn such uncertainties as hysteresis and pressure fluctuation, as well as nonlinear coupling characteristics. In the beginning of control process, the bigger tracking error and pressure fluctuation phenomenon can be avoided by the design of discrete anti saturation PID parallel supervisory control and offline identification, which make it possible for AFCMAC to online adjust its structure parameters in real time. Finally, the fix point rotation experiments and anti disturbance experiments were carried out. And the results suggest the good control performance and online self learning and adjustment ability of AFCMAC.

Key words: pneumatic artificial muscle; 3 DOF parallel platform; posture control; AF CMAC (adaptive fuzzy cerebellar model articulation controller); hysteresis characteristic

0 引言

气动人工肌肉^[1](pneumatic artificial muscle,

PAM)是一种新型的气动执行器。当对气动人工肌肉充气时,其收缩产生的拉力与外力达到平衡,实现被连接物体的准确定位。由于结构原因,气

收稿日期:2011-02-10

[C]//2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, 2006: 3982-3987.

[3] Matsuno F, Tadokoro S. Rescue Robots and Systems in Japan[C]//2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Shenyang, 2005: 12-20.

[4] Pazderski D, Kozlowski K. Trajectory Tracking of under Actuated Skid-steering Robot[C]//American Control Conference. Washington DC, 2008: 3506-3511.

[5] Solc F, Sembera J. Kinetic Model of a Skid Steered Robot[C]//Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation. Cambridge, UK, 2008: 61-65.

[6] Sheth P N, Uicker J J. A Generalized Symbolic Notation for Mechanisms[J]. Journal of Engineering for Industry, 1971, 93(1): 102-112.

[7] Shin Dong Hun, Park Kyung Hoon. Velocity Kinematic Modeling for Wheeled Mobile Robots[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul, 2001: 3516-3622.

[8] 蔡则苏, 洪炳熔, 吕德生, 等. 基于摇杆一转向架的月球车运动学分析与仿真[J]. 机器人, 2003, 25(7): 636-651.

[9] Muir P F, Neuman C P. Kinematic Modeling of Wheeled Mobile Robot[J]. Robotic Systems, 1987, 4(2): 281-340.

[10] 崔莹, 高峰. 可变直径轮月球探测车运动学建模与仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(3): 348-352. (编辑 张 洋)

作者简介: 高伟燕, 女, 1978年生。宁波工程学院机械工程学院讲师。主要研究方向为机器人设计与仿真。发表论文10余篇。
邱法聚, 男, 1979年生。宁波市特种设备检验检测研究院工程师。
杨超珍, 男, 1956年生。宁波工程学院机械工程学院教授。

动人工肌肉只能产生拉力。与其他气动执行器相比,气动人工肌肉具有柔顺、结构简单、经济和拉力重量比大等众多优点,其应用也日益广泛^[2]。笔者着眼类人机器人腰部应用,设计了一种气动人工肌肉三自由度并联平台^[3]。3 根气动人工肌肉向下的拉力与中心立柱滑杆弹簧向上的推力共同作用于上平台圆盘。当达到平衡时,可实现上平台圆盘某一确定的姿态,从而达到协调上下肢的目的。

常温气体的易压缩性、阀口处气体流动的强非线性以及气体流动过程中常见的气压波动等导致气动系统高精度控制有很大的难度。气动人工肌肉的静动态特性也具有极强的非线性和迟滞力等强不确定性因素,而且并联平台的 3 个驱动器之间也存在强烈的耦合。上述特性使得气动人工肌肉并联平台的姿态控制难度更高。

众所周知,智能系统在强非线性和强不确定性系统的控制策略设计中被广泛采用。采用人工神经网络、模糊系统在理论上可以对任意复杂的系统进行建模,且可以避免繁琐的建模分析和控制器设计。小脑模型神经网络(cerebellar model articulation controller,CMAC)是一种基于神经生理学且简单快速的神经网络^[4],与 BP 网络之类的全局逼近方法相比,它具有局部逼近能力、连续(模拟)输入输出能力和一定的泛化能力,而且结构简单,学习速度快,特别适合于实时控制。模糊逻辑与 CMAC 两者结合即构成模糊 CMAC 神经网络^[5],可进一步提高 CMAC 的逼近能力和自适应能力。

本文采用自适应模糊 CMAC(adaptive fuzzy CMAC,AFCMAC)控制器对气动人工肌肉并联平台进行姿态控制,通过合理规划 AFCMAC 输入空间的变量选择,实现了 AFCMAC 对气动人工肌肉迟滞力和气压波动等不确定因素以及耦合特性的感知。用离散抗饱和 PID 控制器并行监督 AFCMAC 的运行。最后,采用定点转动参考输入信号,进行气动人工肌肉并联平台的姿态控制实验。

1 AFCMAC

1.1 模糊 CMAC

图 1 所示为一种气动人工肌肉三自由度并联平台。本文将 CMAC 神经网络应用于该并联平台的姿态控制。下面以二维 CMAC(图 2)为例说明一种模糊 CMAC 的结构原理。定义输入矢量 (a_1, a_2) ,分量 a_1, a_2 在其取值范围上做 7 个等分

划分,每个划分又有 3 层结构,每层又分成 3 个块(block),每个块最多包含 3 个划分。设 m 是 n 维 CMAC 的层数, N_b 为每层所包含块的数目,则每维的等分划分数目为 $m(N_b - 1) + 1$;每块最多包含 m 个划分。为了提高常规 CMAC 的逼近能力和自适应能力,本文设计出一种模糊 CMAC,即在每层的各个块中定义联想度函数。本文中的联想度函数为高斯基函数。

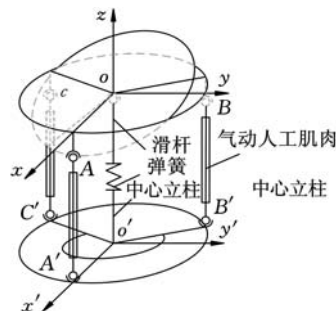


图 1 原理结构

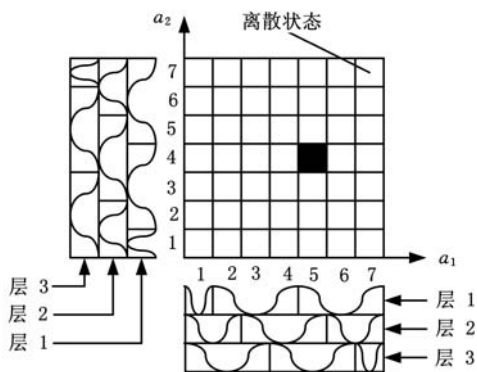


图 2 一种模糊 CMAC 的结构原理图

输入变量 $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbf{R}^n$ 。第 k 层各输入变量被激活的块组合为联想域 $\psi_k (k = 1, 2, \dots, m)$,每层的联想度函数定义为

$$\psi_k = \prod_{i=1}^n \psi_{kij}^* \quad (1)$$

式中, j^* 为第 k 层中输入变量 x_i 被激活的块的索引, $j^* = 1, 2, \dots, N_b$ 。

$\psi_{kij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, N_b)$ 为输入变量 x_i 对应第 k 层中各块的联想度函数:

$$\psi_{kij} = \exp[-(x_i - z_{ij})^2 / a_{ij}^2] \quad (2)$$

式中, z_{ij}, a_{ij} 分别为对应块上的联想度函数(此处为高斯函数)的中心值和宽度。

与每个被激活的联想域 ψ_k 相对应,存在一个存储单元,每个存储单元存储一个权值 w_k ,则模糊 CMAC 的输出为

$$y = \sum_{k=1}^m w_k \psi_k \quad (3)$$

1.2 自适应算法

模糊 CMAC 的自适应能力主要体现为控制过程中不断学习调整 CMAC 的网络权值。

CMAC 的网络权值也就是其存储单元的数据。设第 s 时刻,模糊 CMAC 的实际输出为 y_s ,期望输出为 \bar{y}_s ,则权值的调整量为

$$\Delta w_k = w_k(s+1) - w_k(s) = \phi_k(\bar{y}_s - y_s) / \sum_{k=1}^m \phi_k \quad (4)$$

在实时控制时,理想输出 \bar{y}_s 往往很难直接求解。实际操作时,将期望输出与实际输出的偏差用下式取代:

$$\bar{y}_s - y_s = Ke \quad (5)$$

式中, e 为位置跟踪误差; K 为 PID 控制器的比例系数,文中取为常数。

2 AFCMAC 在线学习

如果控制运行过程中的跟踪误差比较大,则很可能会引起剧烈的气压波动,导致 CMAC 的在线自学习效率极大地降低,甚至会使得在线自学习无法收敛。为了保证控制运行初期不会出现较大的跟踪误差和气压波动现象,使模糊 CMAC 在线实时学习调整成为可能,本文将离散抗饱和 PID 控制器(discrete anti-saturation PID, DASPID)作为并行监督控制器。运行程序根据跟踪误差 $|e|$ 的大小,决定采用 DASPID 还是 AFCMAC 作为主控制器:当 $|e| \geq 1\text{mm}$ 时,采用 DASPID;当 $|e| < 1\text{mm}$ 时,采用 AFCMAC。AFCMAC 的结构如图 3 所示。首先,被跟踪的姿态信号通过一个逆解器,转化为并联平台 3 根气动人工肌肉的位置跟踪信号;再由 DASPID 与 AFCMAC 的并联结构实现并联平台的姿态跟踪控制;经在线实时自学习调整,AFCMAC 的控制性能逐步提高,单根气动人工肌肉位置跟踪误差逐步减小,最终取代 DASPID 而完全过渡到 AFCMAC 控制。

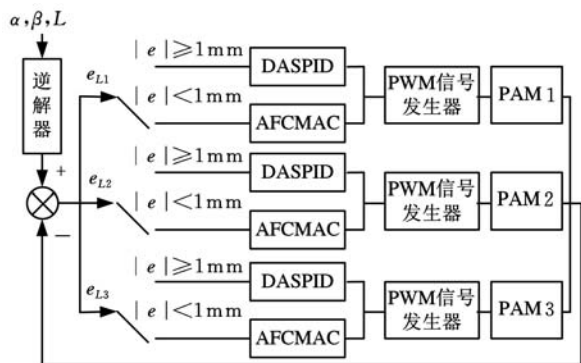


图 3 控制结构框图

AFCMAC 的输入空间变量如下:被控气动人工肌肉的内压为 $p(k)$;被控气动人工肌肉长度为 $L_1(k)$,另外两根气动人工肌肉的长度为 $L_2(k), L_3(k)$;下一采样时刻,被控气动人工肌肉长度变化量 $\Delta L_1(k) = L_1(k+1) - L_1(k)$;当前采

样时刻,被控气动人工肌肉长度变化量 $\Delta L_1(k-1) = L_1(k) - L_1(k-1)$;被控高速开关阀在采样间隔内的充放气时间 ΔT_{on} 与采样周期 T 之比为 $\Delta T_{on}/T$ 。

$p(k), L_1(k), \Delta L_1(k), \Delta L_1(k-1)$ 这 4 个变量组合选择的目的在于有效感知气动人工肌肉的迟滞特性。 $L_1(k)$ 与 $L_2(k), L_3(k)$ 组合选择的目的在于使 AFCMAC 控制器具有一定的解耦能力。在输入空间中选取 $\Delta T_{on}/T$ 的目的在于感知开关阀流体脉冲控制特性所形成的气体波动。

气动人工肌肉的迟滞特性是气动人工肌肉三自由度并联平台系统最重要的不确定因素,为了成功感知气动人工肌肉这一独特迟滞特性,每个 AFCMAC 采用 2 个模糊 CMAC 的并联结构。2 个并联 CMAC 的切换以气动人工肌肉的收缩方向为判断依据,如图 4 所示。



图 4 两个模糊 CMAC 的切换逻辑

为保证每个 AFCMAC 对强非线性强不确定系统控制器的逼近能力和控制性能,对输入空间进行了适当地细化,即将每个模糊 CMAC 的输入变量有 7 层结构,每层分成 5 块。在采样时刻 $t(k)$,自适应模糊 CMAC 输入以上 7 个参数变量 ($p(k), L_1(k), \Delta L_1(k), \Delta L_1(k-1), L_1(k), L_2(k), L_3(k)$),通过式(1)~式(3)产生输出,输出变量为下一采样时刻气动人工肌肉的内压 $p(k+1)$ 。将 $\Delta p, p, \Delta L, L$ 作为 PWM 信号生成器的输入,由生成器输出采样周期内开关阀充气或者放气的开启时间,实现对气动人工肌肉的控制。

3 实验装置

建立了一种气动人工肌肉三自由度并联平台实验系统,如图 5 中左侧装置所示。实验系统的气动回路、测量和控制回路如图 6、图 7 所示。

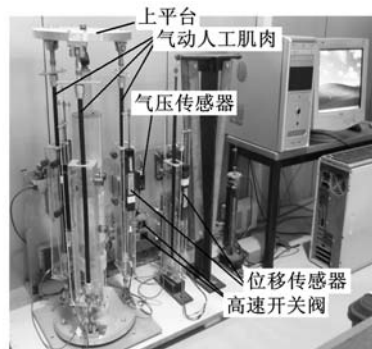


图 5 实验平台

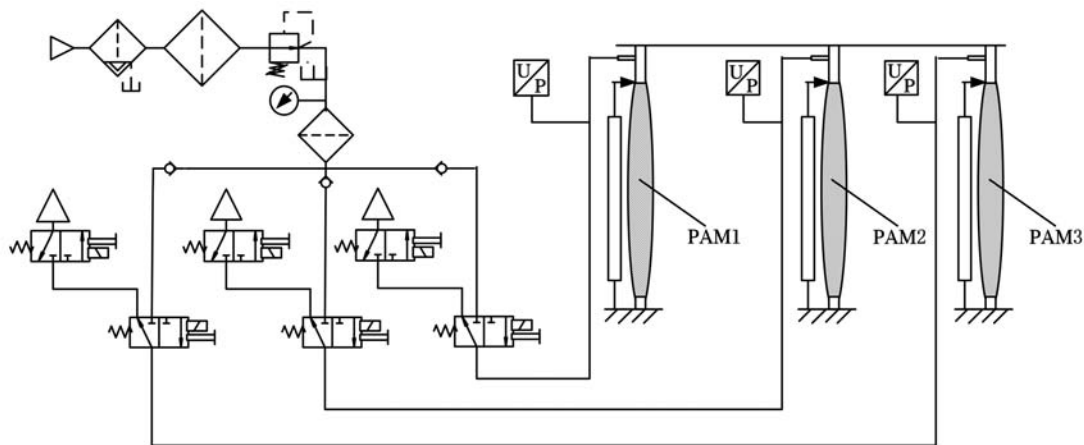


图 6 气动回路

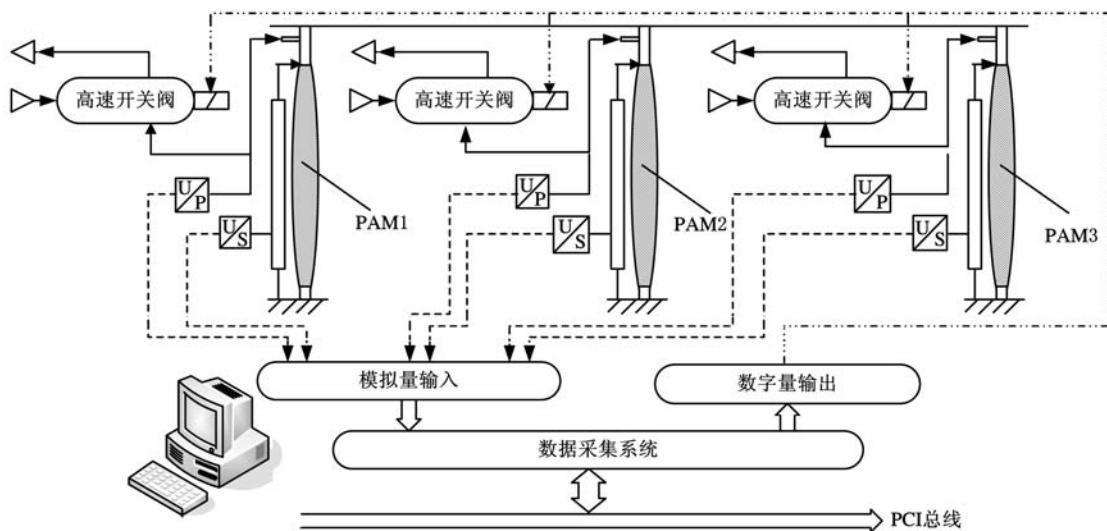


图 7 测量与控制回路

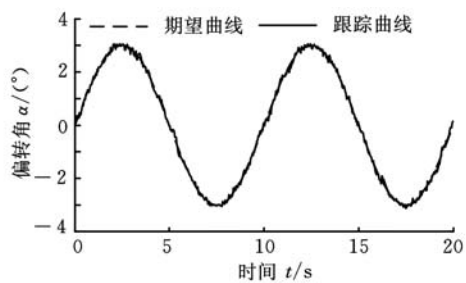
4 实验过程、结果及分析

在图 5 所示的实验平台上进行姿态控制实验。首先,将 3 根气动人工肌肉同时充气至某一气压值,达到初始平衡;然后,以初始平衡位置为参考起点,跟踪参考输入信号;实验时长 20s。实验中,DASPID 的比例系数取 0.4,积分系数取 0.3,微分系数取 0。参考输入信号取为定点转动,即上平台姿态的偏转角 $\alpha(^{\circ})$ 的被跟踪曲线为 $3\sin(2\pi t/10)$,俯仰角 $\beta(^{\circ})$ 的被跟踪曲线为 $3\sin(2\pi t/10)$,中心立柱滑杆高 L 保持不变。

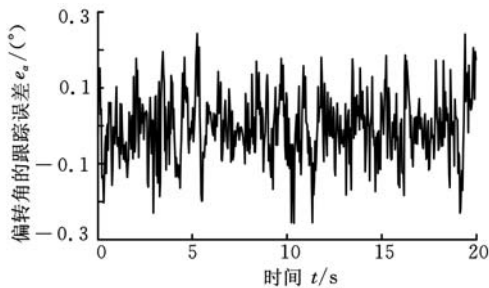
使用 DASPID 对实验平台进行姿态跟踪控制实验,并采集相关实验数据。使用上述实验数据,采用离线辨识的方法,自适应算法初步确定了 AFCMAC 的结构参数。DASPID 并行监督的设计和离线辨识方法保证了控制运行初期不会出现较大的跟踪误差和气压波动,从而使 AFCMAC 的在线实时学习调整成为可能。

图 8~图 10 所示为经离线辨识后,在 DASPID 的并行监督作用下,AFCMAC 控制运行 10 次,每次运行 20s 后,再一次运行的实验结果。通过在线实时学习调整,AFCMAC 的性能逐步提高,单根气动人工肌肉的位置跟踪误差已经完全小于 1mm。此时,DASPID 不再启动,气动人工肌肉已经完全处于 AFCMAC 的控制之中。由图 8b、图 9b、图 10b 可见,跟踪误差分布较为分散,没有特别的明显特征。偏转角 α 和俯仰角 β 的跟踪误差基本都在 $\pm 0.3^{\circ}$ 范围之内;中心立柱滑杆高 L 的最大跟踪误差仅为 $\pm 0.3\text{mm}$ 。

并联平台实验系统的上平台质量为 4.03kg。为了检验在干扰情况下 AFCMAC 神经网络控制器的鲁棒性和在线学习调整能力,通过改变上平台质量的方式对实验系统施加外在干扰。上平台质量的改变采用以下方式:在跟踪运行过程中,在靠近某一气动人工肌肉一侧突然放置一个质量为 5.04kg 的突变偏心质量块。突变偏心质量块的

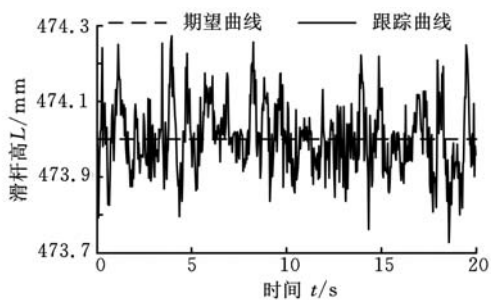


(a)跟踪曲线

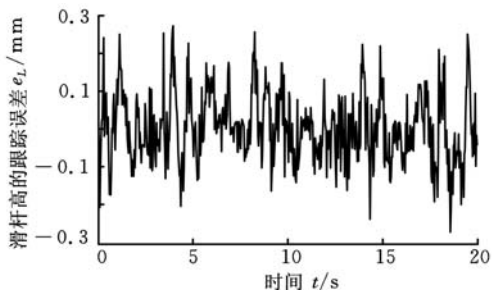


(b)跟踪误差

图 8 偏转角 α 的跟踪曲线和跟踪误差

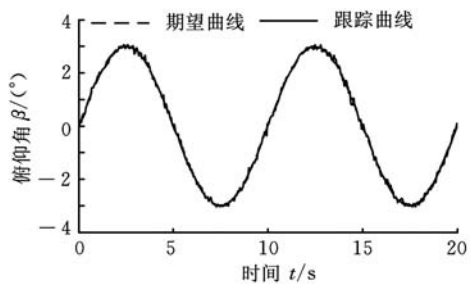


(a)跟踪曲线

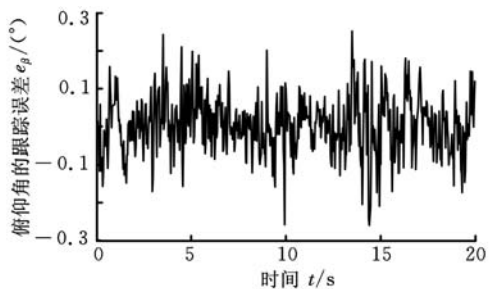


(b)跟踪误差

图 10 中心立柱滑杆高 L 的跟踪曲线和跟踪误差



(a)跟踪曲线



(b)跟踪误差

图 9 俯仰角 β 的跟踪曲线和跟踪误差

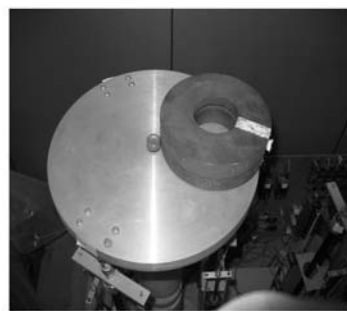
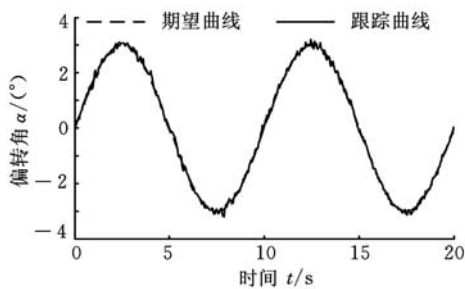
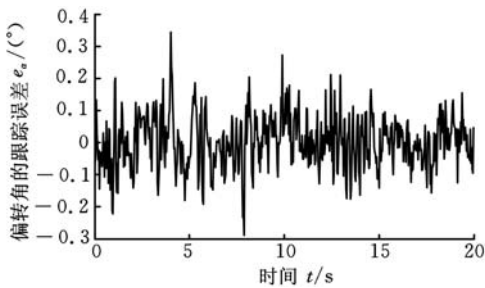


图 11 突变偏心负载安放位置



(a)跟踪曲线



(b)跟踪误差

图 12 突然施加偏重干扰后偏转角 α 的跟踪曲线和跟踪误差

安放位置如图 11 所示。由图 12~图 14 可见,在大约 4s 的时刻施加一个突变偏心质量块,使得俯仰角 β 和中心立柱滑杆高 L 的跟踪误差较之未加干扰时跟踪误差增加一倍多;俯仰角 β 的跟踪误差达到 $0.5^\circ \sim 0.6^\circ$;中心立柱滑杆高 L 的跟踪误差达到了 $0.5 \sim 0.6 \text{ mm}$;偏转角 α 的跟踪误差增加 20% 左右,达到 $0.3^\circ \sim 0.4^\circ$ 。经过大约 5~10s 的在线学习调整,各个姿态参数的跟踪误差逐渐恢复到未加干扰的水平。体现出 AFCMAC 较强的在线学习调整能力。

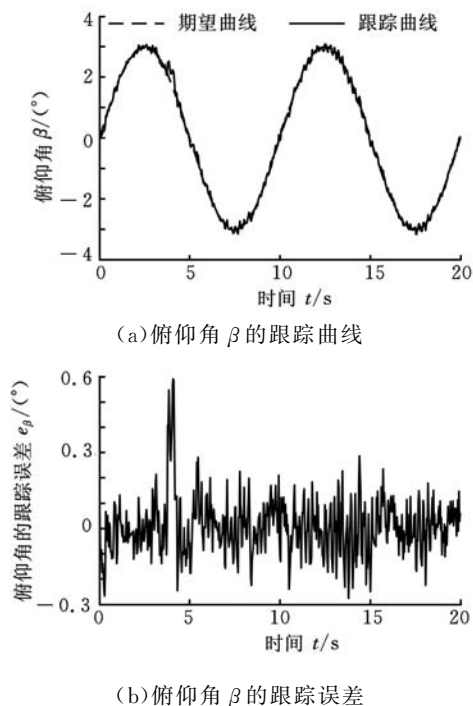


图 13 突然施加偏重干扰后俯仰角 β 的跟踪曲线和跟踪误差

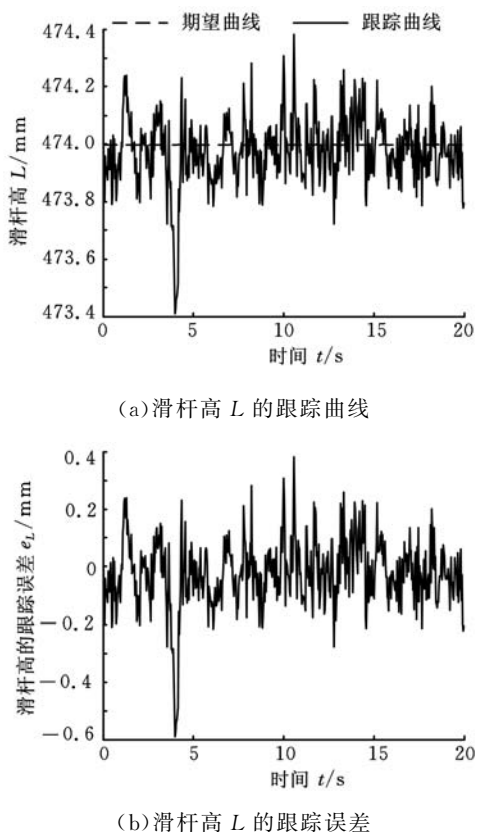


图 14 突然施加偏重干扰后中心立柱滑杆高 L 的跟踪曲线和跟踪误差

5 结语

本文针对一种气动人工肌肉三自由度并联平

台,首先介绍一种自适应模糊 CMAC (AFCMAC);通过规划输入空间,实现了 AFCMAC 对气动人工肌肉迟滞力和气压波动等不确定因素和耦合因素的感知;两个并联的 CMAC 神经网络结构保证了对迟滞特性的把握;对输入变量结构进行了合理细化,保证了 AFCMAC 的控制性能。离线辨识的方法和 DASPID 并行监督的设计,避免了在控制运行初期出现较大的跟踪误差和气压波动,从而使 AFCMAC 在线实时的学习调整成为可能。随着运行次数不断增多,AFCMAC 的控制性能逐步提高,最终使三自由度并联平台完全处于 AFCMAC 的控制之下。当参考输入信号为定点转动,并在 AFCMAC 控制下时,上平台偏转角 α 和俯仰角 β 的最大跟踪误差只有 $\pm 0.3^\circ$,中心立柱滑杆高 L 的最大跟踪误差只有 $\pm 0.3\text{mm}$ 。当施加突变偏心干扰时,即上平台质量由 4.03kg 突变为 9.07kg ,AFCMAC 体现出较为出众的快速在线学习调整能力,只经过大约 $5\sim 10\text{s}$ 就使跟踪误差达到未加干扰的水平。实验结果表明了 AFCMAC 较好的姿态控制性能和在线学习调整能力。

参考文献:

- [1] Festo Co. Festo Pneumatic[M]. V. 28. Esslingen, Germany:Festo KG,2000.
- [2] 陶国良,谢建蔚,周洪. 气动人工肌肉的发展趋势与研究现状[J]. 机械工程学报,2009,45(10):75-83.
- [3] 沈伟,施光林. 一种三自由度气动人工肌肉并联平台动态数学模型[J]. 上海交通大学学报,2011,45(2):219-224.
- [4] Albus J S. A New Approach to Manipulator Control: the Cerebellar Model Articulation Controller (CMAC)[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control,1975,97(7):220-227.
- [5] Chiang C T, Lin C S. CMAC with General Basis Functions[J]. Neural Networks, 1996, 9(7): 1199-1211.

(编辑 张 洋)

作者简介:施光林,男,1962年生。上海交通大学机电控制与物流装备研究所副教授、博士。主要研究方向为电(气)液比例/伺服控制系统以及新型流体控制元件、动力元件和执行元件的机理与特性。获中国发明专利3项。出版专著1部。发表论文50余篇。沈伟,男,1973年生。上海海洋大学工程学院讲师、博士。