

文章编号: 1004-4353(2021)01-0056-08

# 基于二型模糊大脑情感学习控制器的 双足机器人容错控制研究

叶荣冠<sup>1,2</sup>, 郑飞杰<sup>1\*</sup>

( 1. 三明学院 机电工程学院, 福建 三明 365004; 2. 肇庆学院 机械与汽车工程学院, 广东 肇庆 526061 )

**摘要:** 为提高双足机器人行走的控制精度, 提出利用二型模糊大脑情感学习控制器对双足机器人进行容错控制. 该方法利用控制器的非线性估计模块估计双足机器人的系统故障和建模误差信息, 并由计算转矩控制器和鲁棒控制器实现容错控制以解决外部扰动引起的系统不稳定问题. 利用 Matlab 对两个案例进行仿真结果表明, 该方法在双足机器人出现系统故障和外部出现扰动的情况下, 仍能良好地估计出控制器的输入值, 使双足机器人正常运行. 因此, 该方法对提高双足机器人的容错控制精度及轨迹跟踪的可靠性具有很好的参考价值.

**关键词:** 二型模糊; 大脑情感学习控制器; 双足机器人; 容错控制; 外部扰动

**中图分类号:** TG385.2

**文献标识码:** A

## A study of fault-tolerant control for a biped robot by using a type-2 fuzzy brain emotional learning controller

YE Rongguan<sup>1,2</sup>, ZHENG Feijie<sup>1\*</sup>

( 1. School of Mechanical & Electronic Engineering, Sanming University, Sanming 365004, China;

2. College of Mechanical & Automotive Engineering, Zhaoqing University, Zhaoqing 526061, China )

**Abstract:** In order to improve the control accuracy of biped robot walking, a fault-tolerant control method based on type-2 fuzzy brain emotional learning controller is proposed. The controller is used nonlinear estimation module of the controller to estimate the system fault and modeling error information of the biped robot, and implements fault-tolerant control by the computational torque controller and the robust controller to solve the problem of system instability caused by external disturbances. The simulation results of two cases using Matlab show that this method can still estimate the input value of the controller well and make the biped robot operate normally even when the biped robot has system fault and external disturbance. Therefore, this method has a good reference value for biped robots in terms of fault-tolerant control accuracy and trajectory tracking reliability.

**Keywords:** type-2 fuzzy; brain emotional learning controller; biped robot; fault-tolerant control; external disturbance

## 0 引言

目前, 双足机器人已被广泛应用于军事、搜索、救援等多个领域. 但由于机器人不可避免地会出现一些无法预知的故障, 因此需要一种自动容错的控制方案来实时监测和估计机器人系统的故障<sup>[1-2]</sup>. 目前,

收稿日期: 2020-11-15

\* 通信作者: 郑飞杰(1987—), 男, 讲师, 研究方向为机器人智能控制、模糊控制.

基金项目: 福建省自然科学基金(2017J01777); 福建省教育厅中青年教育科研项目(JT180503); 三明学院科学研究发展基金(B201814)

已有一些学者对此进行了研究.例如:文献[3]通过引入一种鲁棒自适应死区的方法来识别机器人系统中发生的故障,并通过重新配置控制律来防止系统在出现故障时发生跟踪性能恶化;然而这种自适应死区技术无法对建模进行不确定性补偿,因此控制性能仍需提高.文献[4-6]使用学习方法因应网络、电子设备及机器人控制过程中出现的故障,但该方法在系统发生大非线性变化故障时其控制性能仍存在不足.研究显示,二型模糊集具有良好的处理系统不确定性的能力<sup>[7-11]</sup>,大脑情感学习控制器具有较快的学习能力<sup>[12-16]</sup>;因此,本文将二型模糊集与大脑情感学习控制器(type-2 fuzzy brain emotional learning controller, T2FBELC)相结合,利用二型模糊大脑情感学习控制器对机器人系统进行控制,并通过实验验证了本文方法的可靠性.

## 1 双足机器人动力学模型

双足机器人的结构示意图如图 1 所示,该结构系统在非线性故障下的动力学方程为<sup>[2]</sup>:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q}) \times [\mathbf{u} - \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \lambda(t - t_0)\bar{\mathbf{f}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})], \quad (1)$$

其中: $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$ 是关节位置、速度和加速度的矢量, $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^6$ ;  $\mathbf{M}$ 是惯性矩阵, $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ ;  $\mathbf{u}$ 是输入转矩矢量, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^6$ ;  $\mathbf{C}$ 是向心力矩阵, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ ;  $\mathbf{g}$ 是重力矩阵, $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^6$ ;  $\lambda(t - t_0)$ 是故障时间的阶跃函数; $\bar{\mathbf{f}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 是双足机器人因故障发生变化的未知非线性矢量, $\bar{\mathbf{f}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^6$ . 惯性矩阵  $\mathbf{M}$  可表示为:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \{\delta_{\tau_1 \tau_2} \cos(q_{\tau_1} - q_{\tau_2})\}, \quad \tau_1 = 1, 2, \dots, 6, \tau_2 = 1, 2, \dots, 6. \quad (2)$$

式(2)中  $\delta_{\tau_1 \tau_2}$  是双足机器人因运动变化的瞬时参数,各参数如表 1 所示. 表 1 中  $h_{\tau_1}$  是双足机器人的质量,  $l_{\tau_1}$  是双足机器人的长度,  $mi_{\tau_1}$  是双足机器人的转动惯量,  $b$  ( $b=0.12$ ) 是双足机器人的增益. 双足机器人连杆的质量和长度如表 2 所示.

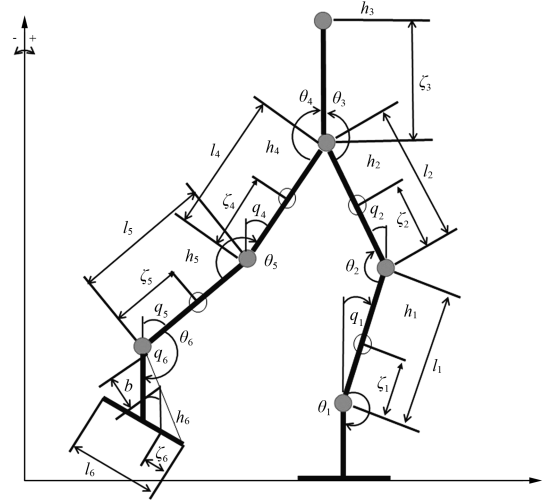


图 1 双足机器人结构示意图

表 1 双足机器人因运动变化的瞬时参数

$\delta_{11} = h_1 \xi_1^2 + (h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6)l_1^2 + mi_1$	$\delta_{22} = h_2 \xi_2^2 + (h_3 + h_4 + h_5 + h_6)l_2^2 + mi_2$
$\delta_{33} = h_3 \xi_3^2 + mi_3$	$\delta_{44} = h_4 (mi_4 - \xi_4)^2 + (h_5 + h_6)$
$\delta_{55} = h_5 (l_5 - \xi_5)^2 + h_6 l_5^2 + mi_5$	$\delta_{66} = h_6 b^2 + mi_6$
$\delta_{12} = h_2 l_1 \xi_2 + (h_3 + h_4 + h_5 + h_6)l_1 l_2$	$\delta_{13} = h_3 l_1 \xi_3$
$\delta_{14} = -h_4 l_1 (l_4 - \xi_4) - (h_5 + h_6)l_1 l_4$	$\delta_{15} = -h_5 l_1 (l_5 - \xi_5) - h_6 l_1 l_5$
$\delta_{16} = -h_6 l_1 b$	$\delta_{23} = h_3 l_2 \xi_3$
$\delta_{24} = h_4 l_2 (l_4 - \xi_4) - (h_5 + h_6)l_2 l_4$	$\delta_{25} = -h_5 l_2 (l_5 - \xi_5) - h_6 l_2 l_5$
$\delta_{26} = -h_6 l_2 b$	$\delta_{34} = \delta_{35} = \delta_{36} = 0$
$\delta_{45} = h_5 l_4 (l_5 - \xi_5) + h_6 l_4 l_5$	$\delta_{46} = h_6 l_4 b$
$\delta_{56} = h_6 l_5 b$	$\delta_{ij} = \delta_{ji} \text{ for } i = 1, 2, \dots, 6 \text{ and } j = 1, 2, \dots, 6$

式(1)中,向心力矩阵  $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  和重力矩阵  $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^6$  的表达式为:

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \{\delta_{\tau_1 \tau_2} \sin(q_{\tau_1} - q_{\tau_2})\}, \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \{-\beta_{\tau_1} \sin(q_{\tau_1})\}. \quad (3)$$

双足机器人各连杆耦合的重力参数  $\beta_{\tau_1}$  如表 3 所示. 表 3 中  $r$  代表重力加速度, 为  $9.81 \text{ m/s}^2$ . 假设双足机器人动力学故障的未知矢量为:

$$\bar{f}(q, \dot{q}) = M(q)f(q, \dot{q}), \quad (4)$$

其中  $f(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^6$  为双足机器人因故障而发生的变化量, 则式(1) 可变成如下形式:

$$\ddot{q} = M^{-1}(q)[u - C(q, \dot{q})\dot{q} - g(q)] + \lambda(t - t_0)f(q, \dot{q}). \quad (5)$$

表 3 双足机器人的重力参数

$\beta_1 = (h_1\xi_1 + h_2l_1 + h_3l_1 + h_4l_1 + h_5l_1 + h_6l_1)r$	$\beta_2 = (h_2\xi_2 + h_3l_2 + h_4l_2 + h_5l_2 + h_6l_2)r$
$\beta_3 = h_3\xi_3r$	$\beta_4 = (h_4\xi_4 - h_4l_4 - h_5l_4 - h_6l_4)r$
$\beta_5 = (h_5\xi_5 - h_5l_5 - h_6l_5)r$	$\beta_6 = -h_6br$

## 2 控制器与非线性估计模块

### 2.1 控制器

基于二型模糊大脑情感学习控制器的机器人反馈控制系统的结构如图 2 所示. 双足机器人的控制器主要由计算转矩控制器和鲁棒控制器组成. 计算转矩控制器的作用是稳定控制系统, 其工作方式是根据机器人反馈的现况信息与期望位置、速度的误差量来计算控制输入量; 鲁棒控制器的作用是通过二型模糊大脑情感学习控制器估计系统故障变化的值, 并通过实时调整来实现容错控制的目的.

在没有系统故障的情况下, 式(5)可表示成如下的动力学方程式:

$$\ddot{q} = M^{-1}(q)[u - C(q, \dot{q})\dot{q} - g(q)]. \quad (6)$$

由双足机器人的动力学模型及控制系统架构可知计算转矩控制器输出  $u_0$  的方程为:

$$u_0 = M(q)(\ddot{q}_d + K_1\dot{e} + K_2e) + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q). \quad (7)$$

式中:  $q_d$  为期望的轨迹矢量,  $q_d \in \mathbb{R}^6$ ;  $e (e = q_d - q)$  为关节位置矢量的跟踪误差,  $e \in \mathbb{R}^6$ ;  $K_1$  和  $K_2$  为对角反馈增益矩阵,  $K_1, K_2 \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ . 将式(7) 代入式(6) 可得误差动态方程式为:

$$\ddot{e} + K_1\dot{e} + K_2e = 0. \quad (8)$$

在式(8) 中, 通过选择适当的  $K_1$  和  $K_2$  即可使跟踪误差达到稳定的收敛, 进而可获得计算转矩控制器的输出值  $u_0$ , 此时控制器的输入值  $u = u_0$ .

当发生外部扰动导致系统故障时, 控制器可利用 T2FBELC 提供的故障估计信息来调节控制器的输入, 以适应系统故障并恢复跟踪性能. 令鲁棒控制器的输出与惯性矩阵的乘积为故障时调节控制的输入  $u_r (u_r = M(q)\hat{f}(q, \dot{q}))$ , 其中  $\hat{f}(q, \dot{q})$  是 T2FBELC 估计非线性故障变化量  $f(q, \dot{q})$  的输出. 由以上可知, 机器人的控制输入可变为  $u = u_0 - u_r$ .

### 2.2 非线性估计模块

在图 2 中, 非线性估计模块使用机器人的控制输入  $u$  与非线性故障变化量估计值  $\hat{f}(q, \dot{q})$  来提供控

表 2 双足机器人连杆的质量和长度

连杆	质量/kg	长度/m
连杆 1	7.7	0.385
连杆 2	13.2	0.412
连杆 3	5.9	0.204
连杆 4	13.2	0.412
连杆 5	7.7	0.385
连杆 6	8.2	0.290

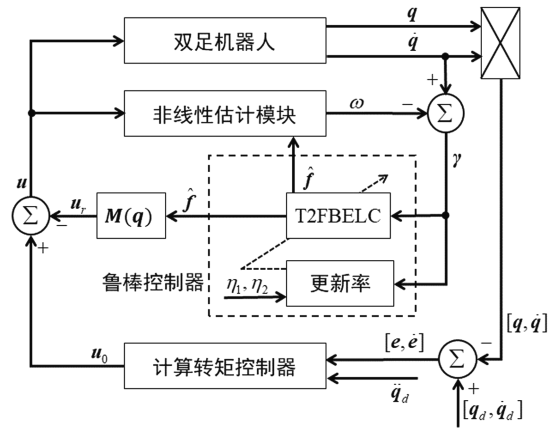


图 2 基于 T2FBELC 的双足机器人反馈控制系统的结构

制器迭代的  $\omega$  估计值,以此达成容错控制的目的.非线性估计模块的表达方程为:

$$\dot{\omega} = \alpha(\dot{q} - \omega) + M^{-1}(q)[u - C(q, \dot{q})\dot{q} - g(q)] + \hat{f}(\dot{q} - \omega). \quad (9)$$

其中:  $\omega$  为非线性估计模块估计的机械臂关节速度的矢量值,非线性估计模块的初始值取  $\omega(0) = \dot{q}(0)$ ;  $\alpha$  为常数.由式(9)可以获得迭代值  $\dot{\omega}$ ,进而可以得出下一迭代过程中的估计值  $\omega$ .

### 3 二型模糊大脑情感学习控制器

本研究基于文献[17-18]中的控制器架构,提出了一种多输入多输出的二型模糊大脑情感学习控制器,如图 3 所示.该控制器具有一个杏仁核感觉神经网络和一个眶额皮质情感神经网络,其中杏仁核感觉神经网络为主控制器,眶额皮质情感神经网络负责微调主控制器以应对外界的刺激.图 3 中的高斯函数  $\tilde{r}_{ij}$  的表达式为:

$$\tilde{r}_{ij} = \exp\left(-\frac{(I_i - \tilde{\zeta}_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}\right), i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m. \quad (10)$$

其中:  $\tilde{r}_{ij} = [\tilde{r}_{ij}^l \ \tilde{r}_{ij}^r]$  是杏仁核和眶额皮质网络输入的高斯函数;  $I_i$  是系统传感输入值;  $\tilde{\zeta}_{ij}$  是平均值,  $\tilde{\zeta}_{ij} = [\tilde{\zeta}_{ij}^l \ \tilde{\zeta}_{ij}^r]$ ;  $\sigma_{ij}$  是方差,  $\sigma_{ij} = [\sigma_{ij}^l \ \sigma_{ij}^r]$ ;  $n$  是状态变数输入数量;  $m$  是区块数量.各符号中的上、下线分别表示每个输入激发的上、下界值.

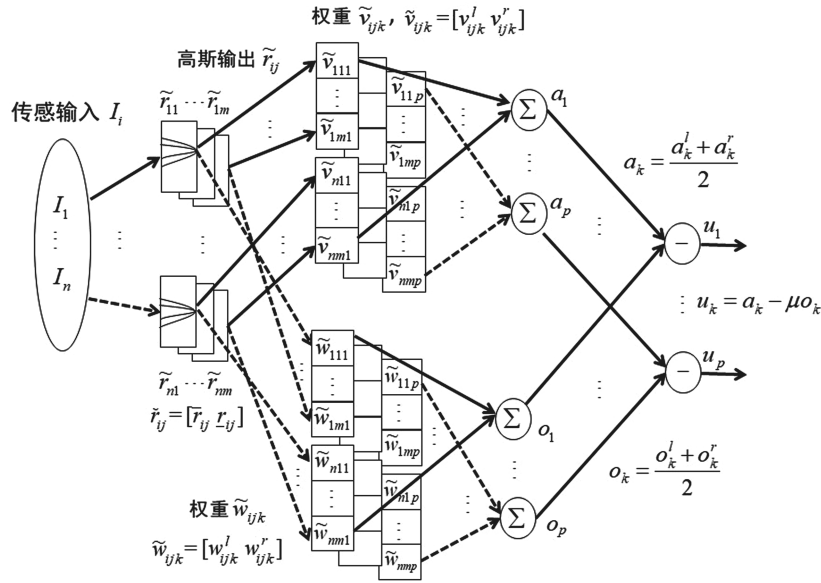


图 3 二型模糊大脑情感学习控制器的示意图

在图 3 中,感觉神经的模糊杏仁核网络的表达式为:

If  $I_1$  is  $\tilde{r}_{1j}$  and  $I_2$  is  $\tilde{r}_{2j}, \dots, I_n$  is  $\tilde{r}_{nj}$  then

$$a_k = [a_k^l \ a_k^r] \text{ for } i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, p.$$

其中  $a_k$  是杏仁核网络的输出量,  $p$  是状态变数的输出数量.

在图 3 中,情感神经的模糊眶额皮质网络的表达式为:

If  $I_1$  is  $\tilde{r}_{1j}$  and  $I_2$  is  $\tilde{r}_{2j}, \dots, I_n$  is  $\tilde{r}_{nj}$  then

$$o_k = [o_k^l \ o_k^r] \text{ for } i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, p,$$

其中  $o_k$  是眶额皮质网络的输出量.

此外,  $\tilde{v}_{ijk}$  ( $\tilde{v}_{ijk} = [v_{ijk}^l \ v_{ijk}^r]$ ) 是杏仁核网络权重值的左右界值矩阵,可表示为:

$$\tilde{v}_{ijk} = [\tilde{v}_{11k}, \dots, \tilde{v}_{1jk}, \tilde{v}_{21k}, \dots, \tilde{v}_{2jk}, \dots, \tilde{v}_{i1k}, \dots, \tilde{v}_{ijk}]^T,$$

for  $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, p$ .

$\tilde{w}_{ijk}$  ( $\tilde{w}_{ijk} = [\tilde{w}_{ij}^l \ \tilde{w}_{ij}^r]$ ) 是眶额皮质网络权重值的左右界值矩阵, 可表示为:

$$\tilde{w}_{ijk} = [\tilde{w}_{11k}, \dots, \tilde{w}_{1jk}, \tilde{w}_{21k}, \dots, \tilde{w}_{2jk}, \dots, \tilde{w}_{i1k}, \dots, \tilde{w}_{ijk}]^T,$$

for  $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, p$ .

因此杏仁核网络输出的左、右点值可以表示为:

$$a_k^l = \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^L \tilde{r}_{ij} \times \tilde{v}_{ij}^l + \sum_{j=L+1}^m \tilde{r}_{ij} \times \tilde{v}_{ij}^l}{\sum_{j=1}^L \tilde{r}_{ij} + \sum_{j=L+1}^m \tilde{r}_{ij}}, \quad a_k^r = \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^R \tilde{r}_{ij} \times \tilde{v}_{ij}^r + \sum_{j=R+1}^m \tilde{r}_{ij} \times \tilde{v}_{ij}^r}{\sum_{j=1}^R \tilde{r}_{ij} + \sum_{j=R+1}^m \tilde{r}_{ij}}.$$

杏仁核网络将左、右两点的平均值作为最终输出量, 即  $a_k = \frac{a_k^l + a_k^r}{2}$ . 同理, 眶额皮质网络输出的左、右点值可以表示为:

$$o_k^l = \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^L \tilde{r}_{ij} \times \tilde{w}_{ij}^l + \sum_{j=L+1}^m \tilde{r}_{ij} \times \tilde{w}_{ij}^l}{\sum_{j=1}^L \tilde{r}_{ij} + \sum_{j=L+1}^m \tilde{r}_{ij}}, \quad o_k^r = \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^R \tilde{r}_{ij} \times \tilde{w}_{ij}^r + \sum_{j=R+1}^m \tilde{r}_{ij} \times \tilde{w}_{ij}^r}{\sum_{j=1}^R \tilde{r}_{ij} + \sum_{j=R+1}^m \tilde{r}_{ij}}.$$

眶额皮质网络将左、右两点的平均值作为最终输出量, 即  $o_k = \frac{o_k^l + o_k^r}{2}$ . 由上述可定义 T2FBELC 的输出

为  $u_{T2FBELC_k} = a_k - \mu o_k, k = 1, 2, \dots, p$ . 其中  $\mu$  为情感因子的微调系数, 表示情感网络对感觉网络的间接影响程度. 此外, T2FBELC 权重更新所需的变化量  $\Delta \tilde{v}_{ijk}$  和  $\Delta \tilde{w}_{ijk}$  可表示为  $\Delta \tilde{v}_{ijk} = \eta_1 \times \{\tilde{r}_{ij} \times [\max(0, \sigma_{ik} - a_k)]\}$ ,  $\Delta \tilde{w}_{ijk} = \eta_2 \times [\tilde{r}_{ij} \times (u_{T2FBELC_k} - \sigma_{ik})]$ . 其中:  $\eta_1$  和  $\eta_2$  分别为两个神经网络系统的学习率;  $\sigma_{ik}$  为感觉神经网络和情感神经网络间的关联项,  $\sigma_{ik} = \rho_i \times I_i + \phi_k \times u_{T2FBELC_k}$ ,  $\rho_i$  和  $\phi_k$  为增益常数.

## 4 仿真实验

**案例 1** 考虑一个由一系列复杂因素造成的双足机器人的非线性故障. 假设故障发生在连杆 1 和连杆 2 中, 且故障发生在第 2.5 s, 此时故障的函数表达式为:

$$f(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 75q_1^2 + 100q_1^2 \dot{q}_2^2 + 7q_2 + 17 \\ 100q_1 q_2 + 25 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

在案例 1 中, 初始关节的位置为  $q(0) = [0.37, -1, 0.75, -0.15, -0.56, 3.85]^T$ , 初始关节的速度为  $\dot{q}(0) = [0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ . 图 4 为案例 1 中每个连杆关节角的时间位置. 由图 4 可知, 虽然双足机器人的连杆 1 和连杆 2 在发生故障时其关节角偏移了期望的控制曲线, 但 T2FBELC 在第 3 s 后能够使关节角渐近地向期望曲线靠近, 由此说明 T2FBELC 能有效地估计故障变化量  $f(q, \dot{q})$ , 进而实现良好的轨迹跟踪能力.

**案例 2** 为了验证控制器的鲁棒性和容错控制能力, 对双足机器人进行系统不确定性仿真, 即在案例 1 发生故障的情形下, 在第 3.5 s 时增加系统的未知项变化量和外部扰动. 未知项变化量与外部扰动函数分别用如下方程表示:

$$\mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} 0.5\text{sign}(\dot{q}_1) + 2\dot{q}_1 \\ 0.5\text{sign}(\dot{q}_2) + 2\dot{q}_2 \\ 0.5\text{sign}(\dot{q}_3) + 2\dot{q}_3 \\ 0.5\text{sign}(\dot{q}_4) + 2\dot{q}_4 \\ 0.5\text{sign}(\dot{q}_5) + 2\dot{q}_5 \\ 0.5\text{sign}(\dot{q}_6) + 2\dot{q}_6 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{u}_d(t) = [\exp(-t), \exp(-t), \exp(-t), \exp(-t), \exp(-t), \exp(-t)]^T. \quad (12)$$

其中:  $\mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}})$  是包含静、动摩擦变化的系统未知项矢量,  $\mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^6$ ;  $\mathbf{u}_d(t)$  是外部扰动的矢量,  $\mathbf{u}_d(t) \in \mathbb{R}^6$ .

根据式(11) 和式(12) 可知,双足机器人的动力学方程式可变为:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q})[\mathbf{u} + \mathbf{u}_d - \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{g}(\mathbf{q}) - \mathbf{F}] + \lambda(t - t_0)\mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}).$$

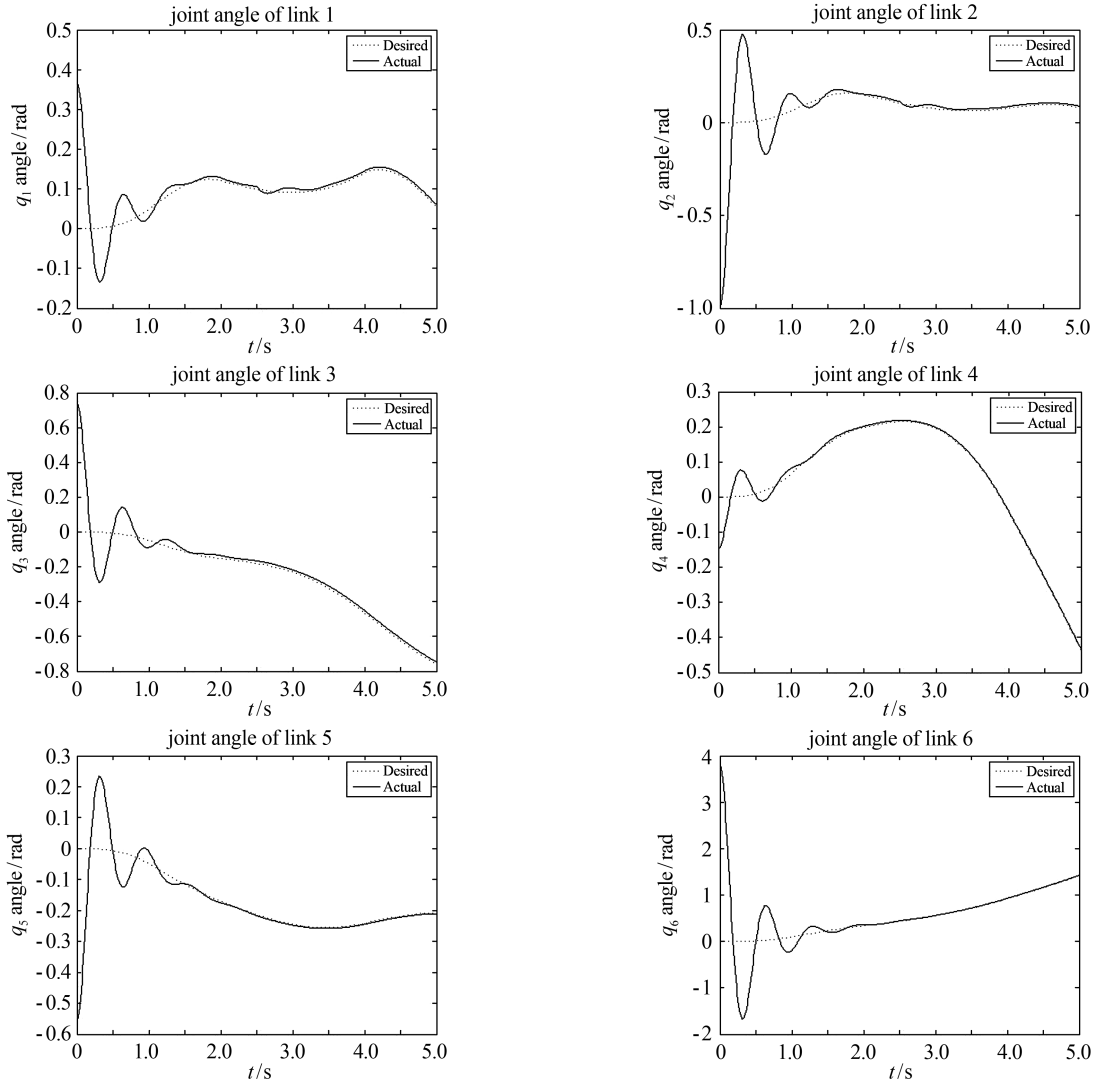


图 4 双足机器人发生非线性故障时各连杆关节角的跟踪时间位置(案例 1)

图 5 为案例 2 中通过容错控制每个连杆关节角的时间位置. 由图 5 可知,控制过程虽然在第 3.5 s 时受到第 2 次偏移期望控制曲线的影响,但各连杆的控制曲线在第 4 s 后仍能渐近地向期望曲线靠近,由此表明 T2FBELC 对系统故障  $\mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}})$  及外部扰动  $\mathbf{u}_d(t)$  均能够实现有效的补偿控制,进而实现对双足机器人的有效控制.



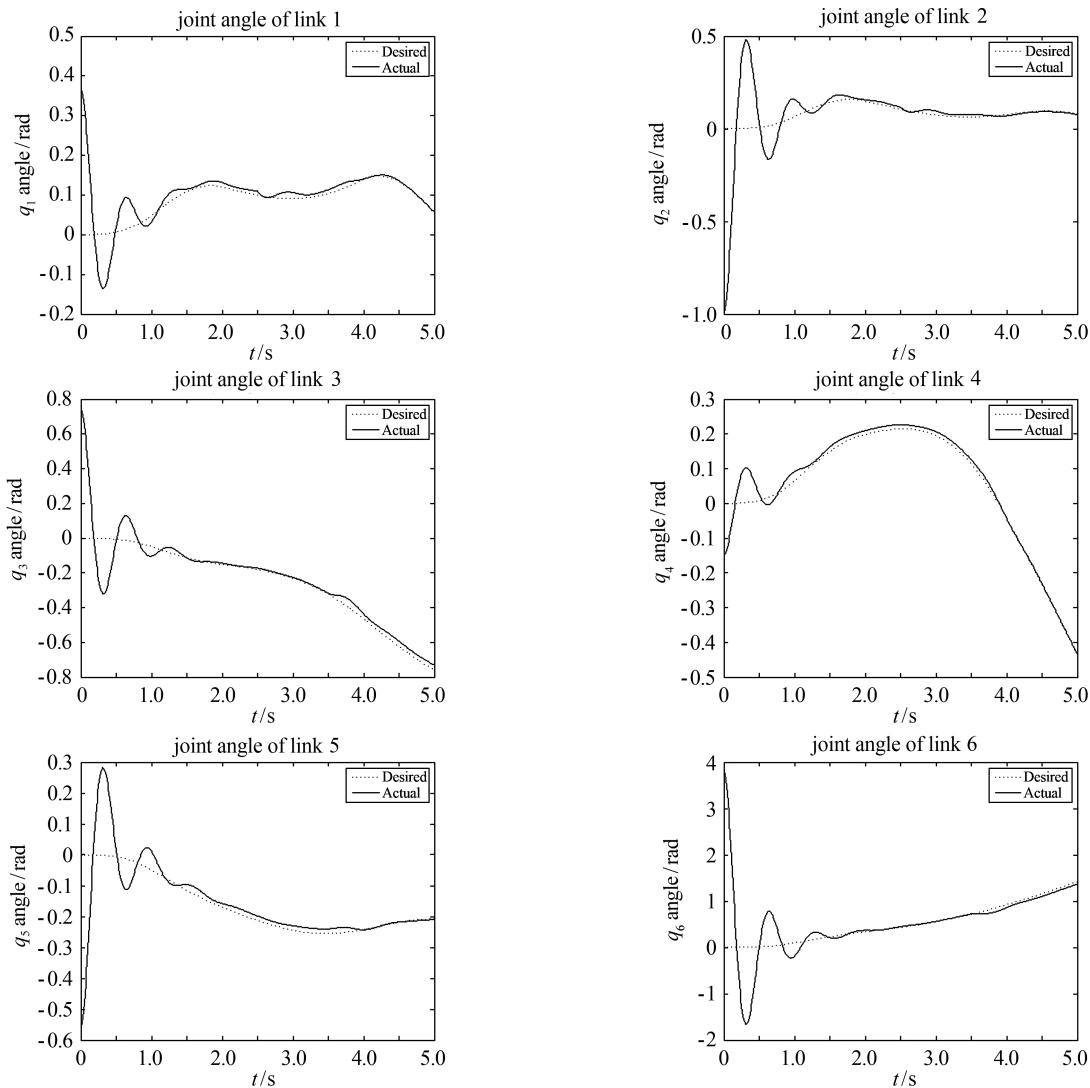


图 5 双足机器人受到外部扰动时各连杆关节角的跟踪时间位置(案例 2)

## 5 结论

利用本文提出的二型模糊大脑情感学习控制器对双足机器人进行行走控制表明,该方法具有良好的跟踪误差收敛性和容错能力,因此该方法可提高双足机器人行走控制的可靠性,并可为其他类型移动机器人的容错控制提供参考.在今后的研究中,我们将对双臂双足机器人的运动数学模型及其基于 T2FBELC 的容错控制做进一步的研究.

## 参考文献:

- [1] 雷荣华,陈力.空间机器人执行器部分失效故障的终端滑模容错控制[J].中国机械工程,2019,30(8):947-953.
- [2] LI Z J, GE S Z S. Adaptive robust controls of biped robots[J]. IET Control Theory and Applications, 2013,7(2): 161-175.
- [3] SONG Q, HU W J, YIN L, et al. Robust adaptive dead zone technology for fault-tolerant control of robot manipulators using neural networks[J]. Journal of Intelligent Robotic System, 2002,33(2):113-137.
- [4] 杨金宝,张昌宏,陈平.基于改进 BP 神经网络的网络故障诊断研究[J].计算机与数字工程,2012,40(2):65-67.
- [5] 肖晶,吴学智.一种基于神经网络的故障诊断新方法研究[J].舰船电子工程,2010,30(1):160-163.
- [6] LIN C M, CHEN C H. Robust fault-tolerant control for a biped robot using a recurrent cerebellar model articulation controller[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B: Cybernetics, 2007,37(1):110-

- 123.
- [7] ZADEH L A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I[J]. Information Sciences, 1975, 8(3): 199-249.
  - [8] 陈瑶, 毛雅洁, 赵涛, 等. 两轮移动巡检机器人的区间二型模糊滑模控制[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(10): 27-33.
  - [9] 马飞越, 韩吉霞, 牛勃, 等. 基于区间二型模糊终端滑模控制的飞行器姿态控制[J]. 空间控制技术与应用, 2019, 45(5): 22-28.
  - [10] 张双, 赵涛, 佃松宜, 等. 机械臂的区间二型模糊超螺旋滑模控制[J]. 空间控制技术与应用, 2019, 45(3): 44-52.
  - [11] ARAS C, KAYNAK O. Interval type-2 fuzzy neural system based control with recursive fuzzy C-means clustering[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2014, 16(3): 317-326.
  - [12] 于仲安, 杨国亮. 基于大脑情感学习模型的参考自适应液压伺服控制系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(3): 671-673.
  - [13] BALKENIUS C, MOREÅN J. Emotional learning: a computational model of the amygdala[J]. Cybernetics and Systems, 2001, 32(6): 611-636.
  - [14] 赵国新, 宋玉宝, 王安, 等. 大脑情感学习控制器的两关节机器人运动控制[J]. 机械设计与制造, 2019(8): 139-141.
  - [15] 黄国勇, 王道波, 甄子洋. 基于大脑情感学习的推力矢量无人机姿态控制[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(12): 2954-2957.
  - [16] LUCAS C, SHAHMIRZADI D, SHEIKHOESLAMI N. Introducing BELBIC: brain emotional learning based intelligent controller[J]. International Journal of Intelligent Automation and Soft Computing, 2004, 10(1): 11-22.
  - [17] CHUNG C C, LIN C M. Fuzzy brain emotional learning control system design for nonlinear systems[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2015, 17(2): 117-128.
  - [18] CHUNG C C, LIN C M. Fuzzy brain emotional cerebellar model articulation control system design for multi-input multi-output nonlinear[J]. Acta Polytechnica Hungarica, 2015, 12(4): 39-58.

~~~~~  
(上接第 31 页)

## 参考文献:

- [1] 刘秉正, 彭建华. 非线性动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 27-35.
- [2] RAJASEKAR S, MURALI K, LAKSHMANAN M. Control of chaos by nonfeedback methods in a simple electronic circuit system and fitzhugh-nagumo equation[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 1997, 8(9): 1545-1558.
- [3] 符五久. Duffing-Vander Pol 系统的 Hopf 分岔[J]. 振动与冲击, 2010, 29(7): 204-209.
- [4] 石艳香. 三阱 Duffing-Van der Pol 系统的分支与混沌[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2019, 42(3): 517-525.
- [5] 刘坤峰, 靳艳飞. 相关白噪声激励下双稳态 Duffing-Van der Pol 系统的随机分岔[J]. 动力学与控制学报, 2019, 17(2): 1-7.
- [6] BALA SHUNMUGA JOTHI V, SELVARAJ S, CHINNATHAMBI V, et al. Bifurcations and chaos in two-coupled periodically driven four-well Duffing-van der Pol oscillators[J]. Chinese Journal of Physics, 2017, 55(5): 1849-1856.
- [7] 秦爽, 张建刚, 杜文举, 等. 一类 Van der Pol-Duffing 系统的 Hopf 分岔控制[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2017, 41(1): 24-31.
- [8] 吴德华, 林毅. 基于混沌的汇流瓶颈区交通流模糊控制与仿真研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2017, 34(6): 110-114.
- [9] OTT E, GREBOGI C, YORKE J A. Controlling chaos[J]. Physics Review Letters, 1990, 64(11): 1196-1199.
- [10] 徐昌进. Arneodo 混沌动力系统的时滞反馈控制[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(3): 1-8.
- [11] LI D K. Modified functional projective synchronization of the unidirectional and bidirectional hybrid connective star network with coupling time-delay[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2019, 24(4): 321-328.
- [12] 程春蕊, 毛北行. 参数未知的分数阶不确定 Rössler 混沌系统的自适应滑模同步[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(8): 186-191.
- [13] CHEN X Y, PARK J H, CAO J D, et al. Sliding mode synchronization of multiple chaotic systems with uncertainties and disturbances[J]. Applied Mathematics and Computation, 2017, 308: 161-173.