

基于神经网络的自由漂浮空间机器人 关节空间鲁棒跟踪控制*

石忠^{1,3} 皮博浩¹ 胡庆雷²

(1. 中国民航大学航空自动化学院, 天津 300300) (2. 哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001) (3. 滨州职业学院, 滨州 256603)

摘要 针对存在不确定性以及干扰的自由漂浮空间机器人关节空间轨迹跟踪问题, 提出了一种基于鲁棒控制思想的神经网络鲁棒控制方法. 对于控制器中由系统惯性参数不确定性引起的非线性不确定项, 利用径向基函数(RBF)神经网络进行逼近, 并且利用鲁棒控制器使系统镇定并保证从干扰到跟踪误差的增益小于或等于给定的指标. 最后, 对本文提出的控制方案进行数值仿真. 仿真结果表明跟踪轨迹误差能以较快的速度收敛到零, 从而验证了所提出方法的有效性.

关键词 自由漂浮, 空间机器人, RBF神经网络, 鲁棒控制, 关节空间

引言

空间机器人可以代替宇航员执行卫星的捕捉、维修、燃料补给等空间任务, 因而具有广阔的应用前景. 处于自由漂浮工作模式下的空间机器人可以节省燃料和电能, 延长卫星的使用寿命, 具有更高的经济价值. 自由漂浮空间机器人系统存在着欠驱动、惯性参数不确定性以及系统内部的摩擦力干扰等问题, 这使得自由漂浮空间机器人系统的轨迹跟踪控制问题变得更加复杂. 因此, 对自由漂浮空间机器人轨迹跟踪控制问题进行的研究具有很重要的理论和应用价值.

针对自由漂浮空间机器人系统存在的不确定性问题, 许多学者提出了基于自适应控制的设计方案. 针对姿态可控的空间机器人系统的关节空间轨迹跟踪问题, 马宝离^[1,2]出了自适应跟踪控制方法, 王景^[3,4]等人首先建立了系统的估计模型, 并提出了鲁棒自适应控制方法, 可以减小跟踪误差. 但上述控制方案对于自由漂浮空间机器人系统并不适用. 陈力^[5-8]等利用增广矢量法, 适当的扩展系统的控制输入和输出, 实现了完全能控形式的空间机器人系统动力学方程惯性参数线性化, 并提出了参数不确定空间机械臂关节轨迹跟踪的控制方法. 自适应方法主要思想是利用参数调节律来对未知或变化的系统惯性参数进行辨识, 从而实现期望轨迹的跟踪, 但如果系统存在不能由定常参数表

示的外部干扰, 参数估计误差往往不能收敛, 从而使得自适应控制策略在实际工程中难以实现. 丰保民^[9]提出了鲁棒模糊神经网络轨迹跟踪控制, 但方案设计过程比较繁琐, 需要预先对神经网络进行初步训练.

对于存在系统不确定性及干扰的自由漂浮空间机器人关节空间轨迹跟踪控制问题, 本文提出了基于神经网络的自由漂浮空间机器人关节空间鲁棒跟踪控制器的设计方案, 应用 RBF 神经网络在线逼近控制器中的非线性不确定项. 利用本文所提出的鲁棒控制器, 可以使系统渐近稳定并且保证从干扰到跟踪误差的增益小于或等于给定的指标, 从而实现期望轨迹的精确跟踪. 数值仿真表明跟踪轨迹误差能以较快的速度收敛到零, 从而验证了所提出方法的有效性.

1 系统动力学方程

考虑作平面运动的带有二连杆机械臂的自由漂浮空间机器人系统, 构成系统的各构件均为刚体, 载体的位置和姿态均不受控, 每个机械臂关节只有一个旋转自由度. 假设系统不受外力和外力矩的作用, 则系统动量矩守恒.

利用拉格朗日第二类方法可以推导得到自由漂浮空间机器人系统的动力学方程^[10]:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = \tau \quad (1)$$

式中: $M(q)$ 为系统的惯量矩阵; $C(q, \dot{q})$ 代表离心力

2010-12-12 收到第 1 稿, 2011-01-16 收到修改稿.

* 国家自然科学基金(61004072); 高等学校博士学科点专项科研基金(20102302110031); 黑龙江省留学回国人员科学基金(LC08C01); 哈尔滨市留学回国基金(2010RFLXG001); 中央高校基本科研业务费专项基金(HIT.NSRIF.2009003)

和哥氏力项; $q = [q_0, q_1, q_2]^T$ 为系统的广义坐标向量, q_0 为载体的姿态角, q_1, q_2 为机械臂关节角度; $\tau = [0, \tau_1, \tau_2]^T$ 为机械臂关节角处输出的控制力矩。

自由漂浮空间机器人动力学系统具有如下动力学特性:

特性1: 惯量矩阵 $M(q)$ 是对称正定矩阵且有界;

特性2: $C(q, \dot{q})$ 的表示是不唯一的, 适当的选取 $C(q, \dot{q})$ 可以使得 $(\dot{M} - 2C)$ 为反对称矩阵, 即对任意的向量 z , 有 $z^T(\dot{M} - 2C)z = 0$ 。

自由漂浮空间机器人载体的位姿不受控, 是一个欠驱动系统. 载体与机械臂之间存在着的动力学耦合问题使得彼此间相互影响, 因此控制器的设计需要解决系统的欠驱动问题. 自由漂浮空间机器人系统构件的质量和转动惯量很难精确得到, 使得系统存在不确定性, 增加了系统轨迹跟踪控制器的设计的难度。

2 神经网络鲁棒控制器设计

由于系统不受外力和外力矩的作用, 系统的动量矩守恒. 假设系统初始动量为零, 则系统动量矩可以写为

$$H = W_0 \dot{q}_0 + W_1 \dot{q}_1 + W_2 \dot{q}_2 = 0 \quad (2)$$

可以解得

$$\dot{q}_0 = -\frac{W_1 \dot{q}_1 + W_2 \dot{q}_2}{W_0} \quad (3)$$

结合(1)和(3), 并考虑由摩擦力引起的干扰, 可得新的动力学方程(为简洁, 仍用原符号表示):

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = \tau + w \quad (4)$$

式中: $M(q) \in R^{2 \times 2}$, $C(q, \dot{q}) \in R^{2 \times 2}$, $q, \tau, w \in R^{2 \times 1}$ 。

(4)式作为原动力学方程(1)的等价变换, 仍保持原方程的特性^[11,12]。

假设需要跟踪的轨迹已知, 并且由广义坐标向量 q_d 及其一阶导数 \dot{q}_d 和二阶导数 \ddot{q}_d 的有界光滑函数描述, 定义跟踪误差为 $e = q - q_d$, 定义坐标变换

$$\begin{cases} x_1 = e \\ x_2 = \dot{e} + e \end{cases}, \text{ 则有 } \dot{x}_1 = x_2 - x_1, \text{ 于是}$$

$$\begin{aligned} M\dot{x}_2 &= \tau + w - C\dot{q} - M\ddot{q}_d + M\dot{e} = \tau + w - C(x_2 - e + \dot{q}_d) - M(\ddot{q}_d - \dot{e}) \\ &= \tau + w - Cx_2 - C(\dot{q}_d - e) - M(\ddot{q}_d - \dot{e}) = \tau + w - Cx_2 + f \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $f = M(\dot{e} - \ddot{q}_d) + C(e - \dot{q}_d)$ 为包含自由漂浮空间机器人模型信息的非线性函数. 在实际工程中,

$M(q), C(q, \dot{q})$ 往往很难得到精确的结果, 导致模型不确定项 f 为未知。

本文基于鲁棒控制思想设计系统控制器, 并引入神经网络作为控制器的一部分, 用以逼近控制器中的非线性不确定函数, 系统期望的控制器形式为

$$\tau = -\hat{f} + \tau_r \quad (6)$$

其中 \hat{f} 为 f 的神经网络逼近, τ_r 为鲁棒控制器剩余部分, 用以确保系统具有鲁棒性和干扰抑制能力。

2.1 神经网络控制器

采用径向基函数(RBF)神经网络来对非线性不确定项 f 进行逼近. RBF神经网络是采用一种局部接受域来进行函数映射的人工神经网络, 是由一个隐含层和一个线性输出层构成的向前网络结构. 已经证明, 采用RBF网络可以实现对任意连续函数的精确逼近^[13]. 不确定项的RBF神经网络可以表示为

$$f = f^* + \varepsilon = Wh(x) + \varepsilon \quad (7)$$

其中 f^* 为 f 的最佳逼近, W 为神经网络最优权值向量, $h = [h_1, h_2, \dots, h_n]$ 为RBF神经网络的径向基向量, 其中 h_j 为高斯函数: $h_j = \exp(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2b_j^2})$, $j = 1, 2, \dots, n$, c_j 为高斯函数 h_j 的中心位置, b_j 为高斯函数 h_j 的宽度. ε 为逼近误差, 如果RBF神经网络的隐层节点数足够大, 则有 $\|\varepsilon\| < \varepsilon_0$, 其中 ε_0 为充分小的正数。

定义RBF神经网络控制器的实际输出为

$$\hat{f} = \hat{W}h(x) \quad (8)$$

其中 \hat{W} 为 W 的估计值, 其自适应学习律为

$$\dot{\hat{W}} = x_2 h(x) F \quad (9)$$

其中 F 为对称正定矩阵, 定义其估计误差 $\tilde{W} = W - \hat{W}$ 。

2.2 鲁棒控制器

将(6)、(8)、(9)代入(5)中, 得

$$\begin{aligned} M\dot{x}_2 &= f - \hat{f} - Cx_2 + w + \tau_r = Wh(x) + \varepsilon - \hat{W}h(x) - Cx_2 + \\ &\quad \varepsilon + w + \tau_r \end{aligned} \quad (10)$$

若令 $E = \varepsilon + w$, 则 E 可看作系统的有界干扰, 选择罚变量为 $z = x_2$, 那么系统的鲁棒控制是设计控制律使得系统内部稳定, 并且从 E 到罚变量 z 的 L_2 增益小于或等于给定的指标 γ . 此时应存在正定的储藏函数 $V(\cdot)$, 使得下列耗散不等式成立

$$\dot{V} + \|z\|^2 - \gamma^2 \|E\|^2 \leq 0 \quad (11)$$

选择储藏函数为

$$V = \frac{1}{2}x_2^T Mx_2 + \frac{1}{2}x_1^T k_1 x_1 + \frac{1}{2}tr(\tilde{W}F^{-1}\tilde{W}^T) \quad (12)$$

其中, $k_1 = k_1^T > 0$. 对 V 两边微分得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & x_2^T M\dot{x}_2 + \frac{1}{2}\dot{M}x_2 + x_1^T k_1 \dot{x}_1 - tr(\tilde{W}F^{-1}\dot{\tilde{W}}^T) = \\ & x_2^T(E + \tau \dot{W}r) + x_1^T k_1(x_2 - x_1) - tr[\tilde{W}h(x)x_2 - \\ & F^{-1}\dot{\tilde{W}}^T] = x_2^T(E + \tau_r + k_1 x_1) - x_1^T k_1 x_1 \end{aligned}$$

取耗散不等式 $H = \dot{V} + \|z\|^2 - \gamma^2 \|E\|^2$, 则

$$\begin{aligned} H = & x_2^T(E + \tau_r + k_1 x_1) - x_1^T k_1 x_1 + x_2^T x_2 - \gamma^2 E^T E \leq \\ & -x_1^T k_1 x_1 - \left\| \frac{1}{2\gamma} x_2 - \gamma E \right\|^2 + x_2^T(\tau_r + k_1 x_1 + \\ & (1 + \frac{1}{4\gamma^2})x_2) \leq -x_1^T k_1 x_1 + x_2^T(\tau_r + k_1 x_1 + \\ & (1 + \frac{1}{4\gamma^2})x_2) \end{aligned}$$

因此, 如果选取控制律

$$\tau_r = -k_1 x_1 - k_2 x_2 - (1 + \frac{1}{4\gamma^2})x_2 \quad (13)$$

其中 $k_2 = k_2^T > 0$, 可以使得 $H \leq -x_1^T k_1 x_1 - x_2^T k_2 x_2 \leq 0$, 即 (12) 所选取的储藏函数满足耗散不等式 (11), 因而 (13) 是系统的鲁棒控制器.

至此, 我们可以总结出如下结论.

定理 对于给定的 $\gamma > 0$ 和对称正定矩阵 F, k_1, k_2 , 如果 RBF 神经网络控制器的控制律和参数调整律由 (8) 和 (9) 给出, 并且鲁棒控制器由 (13) 给出, 则空间机器人系统 (4) 鲁棒镇定, 并且外界干扰到跟踪误差的 L_2 增益小于或等于给定的指标 γ .

3 数值仿真

以下通过仿真验证本文控制器设计方法对于自由漂浮空间机器人关节空间实现轨迹跟踪的有效性. 考虑平面二连杆自由漂浮空间机器人, 若系统的物理参数如下: $l_0 = 0.5\text{m}, l_1 = l_2 = 1.0\text{m}$, 载体质量 $m_0 = 400\text{kg}$, 转动惯量 $I_0 = 66.67\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 第一连杆质量 $m_1 = 16\text{kg}$, 转动惯量 $I_1 = 1.333\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 考虑手臂末端抓取物体, 取第二连杆质量为 $m_2 = (9 + (5 + 2\text{sin}t))\text{kg}$, 转动惯量取为 $I_2 = (0.75 + (0.3 + 0.15\text{sin}t))\text{kg} \cdot \text{m}^2$. 令系统关节空间内的期望轨迹为 $q_{d1} = q_{d2} = 0.1\text{sin}(0.4\pi \cdot t)$, 假设由摩擦力引起的干扰力矩为:

$$w = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1.1\text{sin}(q_1 + \pi/3) + 0.2\dot{q}_1 + 0.05|\tau_1|\text{sign}(\dot{q}_1) \\ 1.1\text{sin}(q_2 + \pi/4) + 0.2\dot{q}_2 + 0.05|\tau_2|\text{sign}(\dot{q}_2) \end{bmatrix}$$

仿真时系统载体姿态及各关节角度初始值随机取为 $q = [-0.12, -0.05, 0.07]^T$, 神经网络权值向量 \hat{W} 的各个元素初始值均取为 0, 高斯函数中的参数随机选取, 取正定矩阵 $F = \text{diag}[5, 5], k_1 = \text{diag}[25, 25], k_2 = \text{diag}[10, 10]$, 鲁棒控制器参数取 $\gamma = 0.1$.

为说明控制方案的有效性, 将本文所提出的控制方案与采用自适应鲁棒控制方法的效果进行比较, 图中虚线所表示的自适应鲁棒控制方案在鲁棒控制器中引入与不确定性上界对应的可调参数, 通过在线调整该参数实现对系统的控制.

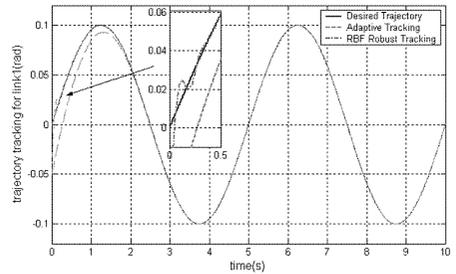


图1 关节1轨迹跟踪

Fig. 1 Trajectory tracking for link1

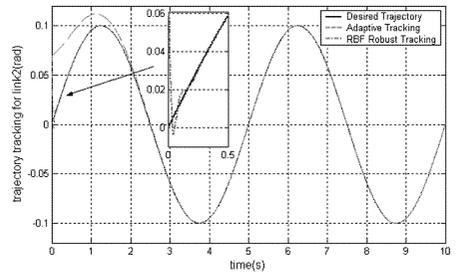


图2 关节2轨迹跟踪

Fig. 2 Trajectory tracking for link2

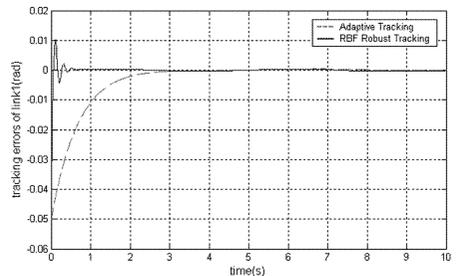


图3 关节1轨迹跟踪误差

Fig. 3 Tracking errors of link1

图1、图2为关节空间轨迹跟踪仿真,图3、图4为各关节轨迹跟踪误差。

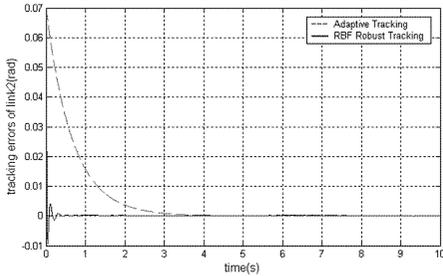


图4 关节2 轨迹跟踪误差

Fig. 4 Tracking errors of link2

从仿真结果可以看出文中的控制方法可以更快地实现自由漂浮空间机器人在关节空间的轨迹跟踪。

4 总结

针对自由漂浮空间机器人系统存在的欠驱动、模型不确定性以及受摩擦力干扰等问题,在系统关节空间的轨迹跟踪问题中,本文提出了基于鲁棒控制思想的设计方法.利用神经网络来逼近控制器中的非线性不确定项,神经网络的引入使得系统控制器具有更强的自适应和学习能力,降低系统不确定性对系统的影响,鲁棒控制器用来消除神经网络的逼近误差,增强系统的稳定性和抗干扰能力,保证干扰到跟踪误差的增益小于或等于给定的指标,使系统能够在关节空间内实现对期望轨迹的跟踪.仿真实验证明了该控制方案的有效性。

参 考 文 献

- 任艳青,马保离.基于后退设计的空间机器人系统的自适应控制.航空学报,2007,28(2):490~494 (Ren YQ, Ma BL. Adaptive control of space robot system based on back-stepping design. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007,28(2):490~494 (in Chinese))
- 马保离,霍伟.空间机器人系统的自适应控制.控制理论与应用,1996,13(2):191~197 (Ma BL, Huo W. Adaptive control of space robot system. *Control Theory and Application*, 1996,13(2):191~197 (in Chinese))
- 王昊瀛,王景,吴宏鑫.平面型两关节空间机器人的自适应轨迹控制.航天控制,1999,(3):13~19 (Wang H Y, Wang J, Wu H X. Adaptive trajectory control of planar two-joint space robot. *Aerospace Control*, 1999,(3):13~19

(in Chinese))

- 王景,王昊瀛,刘良栋等.空间机械臂的鲁棒复合自适应控制.自动化学报,2002,28(3):378~384 (Wang J, Wang H Y, Liu L D. et al. Robust composite adaptive control for space manipulators. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(3):378~384 (in Chinese))
- 陈力,刘延柱.参数不确定空间机械臂关节轨迹跟踪的增广自适应控制方案.空间科学学报,2002,20(4):348~354 (Chen L, Liu Y Z. Adaptive control for space manipulator to track the desired trajectory in joint space. *Chinese Journal of Space Science*, 2002,20(4):348~354 (in Chinese))
- 陈力.参数不确定空间机械臂系统的鲁棒自适应混合控制.控制理论与应用,2004,21(4):512~516 (Chen L. Robust and adaptive composite control of space manipulator system with uncertain parameters. *Control Theory and Application*, 2004,21(4):512~516 (in Chinese))
- 洪昭斌,陈力.双臂空间机器人关节运动的一种增广自适应控制方法.空间科学学报,2007,27(4):347~352 (Hong Z B, Chen L. Adaptive control for free-floating dual-arm space robot system in joint space. *Chinese Journal of Space Science*, 2007,27(4):347~352 (in Chinese))
- 郭益深,陈力.双臂空间机器人的自适应鲁棒性联合控制.系统仿真学报,2009,21(3):625~628 (Guo Y S, Chen L. Adaptive robust control for free-floating space robot system with dual-arms to track desired trajectory in joint space. *Journal of System Simulation*, 2009,21(3):625~628 (in Chinese))
- Wang C H, Feng B M, Ma G C. et al. Robust tracking control of space robot using fuzzy neural networks. *Proceedings of 2005 IEEE Int. Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, 2005:181~185
- Papadopoulos S, Dubowsky S. Dynamic singularities in free-floating space manipulator. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1993,115(1):44~52
- 郭益深,陈力.自由漂浮双臂空间机器人基于RBF神经网络的关节运动自适应控制.系统仿真学报,2009,21(10):3051~3055 (Guo Y S, Chen L. Adaptive control of joint motion of free-floating space robot system with dual-arms based on RBF Neural Network. *Journal of System Simulation*, 2009,21(10):3051~3055 (in Chinese))
- 丰保民,马广程,温奇咏等.任务空间内空间机器人鲁棒智能控制器设计.宇航学报,2007,28(4):914~919 (Feng B M, Ma G C, Wen Q Y. et al. Design of robust intelligent controller for space robot in task space. *Journal of*

- Astronautics*, 2007, 28(4): 914 ~ 919 (in Chinese))
- 13 Wen S H. Uncertainty robot adaptive control based on RBF Neural Network. *Proceedings of the 23rd Chinese Control Conference*, 2004, 1193 ~ 1197
- 14 王耀南, 孙炜. 机器人鲁棒轨迹跟踪控制系统. *动力学与控制学报*, 2004, 2(1): 77 ~ 83 (Wang Y N, Sun W. A robot robust trajectory tracking control system. *Journal of Dynamics and Control*, 2004, 2(1): 77 ~ 83 (in Chinese))
- 15 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用. 北京: 清华大学出版社, 2003 (Mei S W, Shen T L, Liu K Z. *Modern robust control theory and application*. Beijing: Tsinghua University Press, 2003 (in Chinese))

NEURAL NETWORK BASED ROBUST TRAJECTORY TRACKING CONTROL IN JOINT SPACE FOR FREE-FLOATING SPACE ROBOT *

Shi Zhong^{1,3} Pi Bohao¹ Hu Qinglei²

(1. *College of Aeronautical Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China*)

(2. *School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

(3. *Binzhou Vocation College, Binzhou 256600, China*)

Abstract Considering the model uncertainty and disturbances of Free-Floating space Robot, an Neural Network based robust control scheme is proposed aim to solve the problem of trajectory tracking in joint space for free floating space robot. Using RBF neural network to approximate the nonlinear function of controller, robust controller is used to compress the approximation error and external disturbance. The presented control scheme can stabilize the system and guarantee the gain from disturbance to tracking error is lower than the given index. Simulation results show the feasibility of the proposed control scheme.

Key words free floating, space robot, RBF neural network, robust control, joint space