

# 空间机器人控制方法研究综述

张文辉<sup>1,2</sup>, 朱银法<sup>1</sup>

(1. 丽水学院 工学院, 浙江 丽水 323000; 2. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**空间机器人具有强耦合非线性的动力学特征,因此欲达到较高的跟踪精度,需要采用高级的控制策略。首先,对空间机器人轨迹跟踪控制方法进行分类阐述;接着,对无速度反馈情况下,基于速度观测器的控制方法进行论述;最后,对存在关节死区机器人的补偿控制方法进行论述。在对目前空间机器人的控制方法进行阐述的同时,对抑制不确定性干扰及加快误差收敛速度问题进行了探索。

**关键词:**空间机器人;轨迹跟踪;输出反馈;死区补偿

中图分类号: TP242.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2013)03-0012-05

## Overview of the Research on Control Methods of the Space Robot

Zhang Wenhui<sup>1,2</sup>, Zhu Yinfa<sup>1</sup>

(1. College of Technology, Lishui University, Lishui, Zhejiang 323000, China;

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

**Abstract:** The space robot has strong coupling nonlinear dynamics characteristics, so the advanced control strategy must be adopted to achieve the desire high tracking precision. Firstly, the trajectory tracking control method of the space robot was classified, and then the output feedback control method based on the speed observer was discussed without speed signal feedback; finally, the existing joint dead zone compensation control method of the robot was stated in detail. This paper expounded the current space robot control method and also made a positive research into how to restrain the error uncertainty interference and how to accelerate the convergence speed of the two problems.

**Key words:** space robot; trajectory tracking; output feedback control; dead zone compensation

随着航天技术的快速发展,空间机器人的作用日益凸显。空间机器人可以捕捉失效卫星进行回收利用,在轨修理飞行器及补充燃料来延长飞行器工作寿命,进行大型空间机构的搬运和组装,清理太空垃圾以避免与卫星相撞,进行航天飞机和空间站的对接分离操作,甚至可以承担空间军事攻防对抗等复杂任务,因此,研究空间机器人控制技术具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。

空间机器人作为复杂的多输入多输出非线性系统,具有时变、强耦合和非线性的动力学特征,其控制十分复杂<sup>[3-4]</sup>。由于当前技术水平的局限及主观因素造成测量和建模的不精确,再加上外部扰动等不确定性,实际上无法得到机器人系统精确、完整的动力学模型<sup>[5-7]</sup>。因而,不确定性机器人系统控制方法的研究成为近年来国内外学者关注的热点,其中,抑制不确定性干扰和加快误差收敛速度,是需要重点解决的两个问题。

首先,对传统的空间机器人轨迹跟踪控制方法从自适应控制、鲁棒控制以及神经网络控制等方面进行了分类阐述;然后,对无速度信息反馈情况下空间机器人的输出反馈控制方法进行了详述;最后,针对存在关节

收稿日期: 2013-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(61171189); 浙江省自然科学基金项目(LY12E05011); 丽水市科技局公益项目(2012JYZB30)

作者简介: 张文辉(1980—), 河南正阳人, 讲师, 博士, 主要从事智能控制、机器人动力学与控制方面的研究。

E-mail: hit\_zwh@126.com

死区的机器人的补偿控制进行了论述。在对目前空间机器人的控制方法进行阐述的同时,对其存在的问题进行了积极探索。

由于基体的自由漂浮特性,相对于地面机器人,空间机器人具有更加复杂的动力学特性和耦合特性,但地面机器人丰富的研究成果对于空间机器人的研究依然具有重要的借鉴价值和理论意义。

## 1 空间机器人传统控制方法

机器人传统控制方法主要有比例-积分-微分(PID,proportion integral derivative)控制和计算力矩控制方法。

PID 控制器结构简单,完全不考虑机器人的动力学特性,不依赖系统动力学矩阵的惯性结构,只需根据实际轨迹和期望轨迹的偏差进行负反馈,通常称为 PID 控制或 PD 控制。由于 PID 控制器忽略了系统中非线性因素的影响,因而属于线性控制器,这类方法有两个缺点:一是无法实现高精度跟踪控制,且难以保证受控机器人具有良好的动态和静态品质;二是由于空间机器人的非线性特点,需要较大的控制能量<sup>[8]</sup>。

计算力矩的控制思想为:利用机器人的动力学模型,在控制回路中引入非线性补偿,使这个复杂的非线性强耦合系统实现近似全局线性化解耦。该方法是典型的考虑机器人动力学模型的动态控制方案,其控制量的确定以及控制目标的实现主要依赖于精确的系统动力学模型。

由于测量技术水平的限制,空间机器人很难预先获得精确的数学模型,且存在摩擦干扰等不确定因素的影响,再加上空间机器人所处的特殊环境(如燃料的消耗),会造成系统参数发生变化,这些均对计算力矩控制法的应用构成了很大的挑战。而 PID 控制器具有设计简单,易于实现,且动态特性良好的优点,因此目前广泛应用于包括机器人在内的非线性对象中。为了进一步提高 PID 控制器的性能,基于各种改进的 PID 控制方法是未来研究的一个重点方向,例如神经 PID、模糊 PID 以及各种 PID 参数整定算法等。

## 2 空间机器人鲁棒自适应控制方法

由于空间机器人系统具有复杂的结构,处于特殊的太空环境及不确定工况,其具体参数通常很难精确获得。空间机器人需要满足高精度的轨迹跟踪控制,因此所设计的控制器必须具有自适应能力,当环境或自身工作状态发生变化时,系统参数也随之发生变化,此时控制器应能够适应变化或不受其影响而保持较好的控制效果。

自适应控制的显著特点是存在可调参数,当环境变化时,可以调整控制器参数来适应新的环境或在线学习不确定参数来达到期望的控制,在空间机器人领域获得了一定应用。Walker<sup>[9]</sup>,Xu 等<sup>[10]</sup>及霍伟等<sup>[11]</sup>相继提出了各自的自适应控制方法,但这些方法均是针对基体姿态可控的空间机器人提出的。Shin<sup>[12]</sup>,Parlaktuna<sup>[13]</sup>,Gu 等<sup>[14]</sup>提出了改进的自适应控制方法,并将其应用于具有更强耦合性的姿态不可控、基体自由漂浮的空间机器人系统。

上述自适应控制策略虽然能够对参数不确定性进行辨识,通过实时修正控制规则来适应参数模型的不确定性,但对于空间机器人存在的外部扰动、摩擦等非参数不确定性,单纯的自适应控制器难以保证系统的稳定性,因此将自适应控制与其他先进的控制策略结合,发挥各自的优越性以进一步提高系统鲁棒性,正成为非线性控制研究的重点领域。

鲁棒自适应控制方法是以自适应控制补偿参数不确定性,以鲁棒控制补偿非参数不确定性的控制方法。Chen 等<sup>[15]</sup>针对不确定性机器人系统提出包含抗衰减度跟踪指标的  $H_{\infty}$  鲁棒控制策略;Choi 等<sup>[16]</sup>以闭环系统  $L$  范数为性能指标设计了一种最优控制器;Lee 等<sup>[17]</sup>利用  $H_{\infty}$  控制理论给出了机器人的位置控制研究结果;Slotine 等<sup>[18]</sup>在存在扰动的情况下采用  $\sigma$  参数修改和鲁棒增强措施,提出了自适应鲁棒控制器;Chu 等<sup>[19]</sup>提出了带扰动观测器的鲁棒控制策略;丰保民等<sup>[20]</sup>针对不确定性空间机器人系统,利用耗散性理论提出了鲁棒自适应控制策略;王洪斌<sup>[21]</sup>针对带扰动的机器人系统,利用无源性理论设计了鲁棒自适应控制器;陈志勇等<sup>[22]</sup>针对参数不确定漂浮基空间机器人系统,基于增广变量法提出了鲁棒自适应控制策略。

鲁棒自适应控制方法从实用的角度确保了复杂机器人系统的高品质控制,但考虑到机器人的未知不确

定性部分,采用此类控制必须依靠先验的专家知识来进行保守的上界估计,从而确保系统的鲁棒性,这样会带来过大的控制作用,不仅造成浪费,还会导致控制器或执行器饱和,不是最佳控制。因此,设计自适应学习机制来估计不确定系统模型,避免保守上界的估计是鲁棒自适应控制研究的重点方向。

### 3 空间机器人自适应神经网络控制方法

网络结构具有并行分布的特点,因而神经网络具有一定的容错性及很强的学习能力,能够逼近任意未知非线性系统,因此,近年来成为国内外研究的热点领域之一。基于神经网络的机器人控制方法有两种,即神经网络的自学习控制及神经网络的自适应控制<sup>[23]</sup>。目前,基于神经网络的自学习控制在理论上还缺乏有效手段保证系统稳定性<sup>[24]</sup>,因此,基于稳定性理论的神经网络自适应控制方法近年来成为研究的重点<sup>[25]</sup>。

Bhasin<sup>[26]</sup>, Kim<sup>[27]</sup>和 Jung 等<sup>[28]</sup>分别提出了各自的神经网络自适应控制方法,并证明了系统的稳定性; Guo 和 Cheng 等<sup>[29]</sup>借助于神经网络、GL Ge-Lee 矩阵及其乘积算子提出了神经网络自适应控制策略; San-ner 等<sup>[30]</sup>针对系统动力学方程和雅可比矩阵中存在的参数不确定性,提出了多神经网络自适应控制方案;谢箭等<sup>[31]</sup>针对存在建模误差的机器人系统,提出了各自的神经网络自适应控制方案;丰保民等<sup>[32]</sup>基于  $H_\infty$  理论设计了神经网络的鲁棒控制器,在空间机械臂末端负荷变化不大时,也能够保证系统的稳定性;丁学恭<sup>[5]</sup>指出,当机器人参数发生突变时(例如工作环境突变、末端抓取大质量负荷等),自适应控制系统的参数需要长时间才能收敛,易造成被控对象输出失控,稳定性被破坏。

神经网络自适应控制具有较好的学习特性,但存在一个问题:当受控对象发生变化时,自适应控制需要通过学习和调整控制规律来辨识或逼近系统模型,实现比较复杂。该控制方法对于时不变或慢时变被控对象能够取得较好控制效果,而对于快时变甚至突变型被控对象无能为力,甚至导致控制器失效,稳定性破坏。因此,如何与其他控制方法结合,来弥补神经网络动态特性的不足,也是当前学者研究的重点。

### 4 空间机器人输出反馈控制方法

在实际工程控制中,高精度的关节角位置是可以借助光电码盘和解算器精确获得的,而速度信息通常采用测速机测量,在很多情况下易受到噪声信号的干扰,且测速机产生的定子磁场的不连续、波动矩和其他高频特性等又进一步降低了测速信号的质量,测速电机同时增加了关节质量<sup>[33-34]</sup>,这些均影响了控制精度。

上述原因造成实际工程中难以达到较高的控制精度,因此在无速度信息反馈的情况下,通过使用关节角位置信息来设计速度观测器来估计速度信息进行控制,即输出反馈控制方法变得尤为重要。Canudas<sup>[35]</sup>提出了输出反馈控制方法,该方法能够保证系统的鲁棒性,但是需要估计保守的不确定系统上界。Kim 等<sup>[36]</sup>提出了基于模糊逻辑输出反馈控制策略,通过调整律来实时调整模糊逻辑规则,该方法需要先验的专家知识。Farzaneh<sup>[37]</sup>, Lewis 等<sup>[38]</sup>相继提出了基于神经网络的观测器估计关节角速度,无需确切的数学模型,闭环系统可以达到一致最终有界。

上述控制方法是机器人基于速度观测器的控制方法的代表,基本上反映了输出反馈控制方法的研究现状,解决了无速度信息情况下非线性系统的控制问题。为了进一步提高神经网络的动态特性,国内外学者将神经网络与变结构进行有效结合,其中,利用神经网络的优化特性来实施变结构控制<sup>[39-41]</sup>能够减弱系统“抖振”并提高神经网络的动态特性,成为当前研究的热点领域。

### 5 空间机器人死区非线性补偿控制方法

无论是空间机器人还是地面机器人,其执行机构的动力传动系统中常常存在着一些影响运动控制的非线性形式,例如齿隙、死区、摩擦及饱和等。这些因素影响着系统的控制性能,其中摩擦死区非线性作为一种主要的非线性特性,除造成输出误差外,严重时还会对系统造成极限环振荡。Tao 等<sup>[42]</sup>在假设死区非线性能够线性参数化的基础上,提出了自适应补偿控制方法。Rastko 等<sup>[43]</sup>首先提出了神经网络补偿控制方法,并对系统稳定性给出了严格的证明。

上述研究成果中,采用神经网络的控制方法能够较好地补偿系统死区非线性,存在的问题是自适应控制

需要通过学习和调整控制规律来辨识或逼近系统模型,动态性较差。而且,神经网络控制采用的并行处理系统对硬件的处理速度要求较高,单片机等低端处理器难以满足处理要求,DSP(数字信号处理,digital signal processing)等中端处理器对于复杂算法也存在滞后问题,而生物芯片、神经计算机等高端处理设备由于价格太高而难以普及,从而影响了神经网络控制方法的工程应用。针对这个问题,提高神经的网络学习速度成为一个重点研究方向,其中,神经网络的动态网络结构构建算法成为目前研究的热点之一。

## 6 结束语

对空间机器人的各种控制方法进行了归纳和综述。由于空间机器人属于强耦合非线性系统,其控制方法较复杂。首先,对空间机器人轨迹跟踪控制方法进行分类阐述;然后,对无速度反馈情况下采用观测器的控制方法进行论述;最后,针对存在关节死区机器人的补偿控制进行详述。在对目前空间机器人的控制方法进行阐述的同时,对存在的问题进行了积极探索。当前,不确定性机器人的控制方法研究主要是针对建模误差及有限的外界干扰来进行的,而对于参数突变造成的极端工况研究甚少,而且,针对加快误差收敛速度方法的研究也不甚完善,有待于进一步探索。

### 参考文献:

- [1]Craig J J. Adaptive control of mechanical manipulators[J]. The International Journal of Robotics Research,1987,6(2):172-184.
- [2]Yoshida K. Space robot dynamics and control: To orbit, from orbit, and future[C]//Robotics Research: The 10<sup>th</sup> International Symposium. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2003: 449-456.
- [3]柳长安,李国栋,吴克河. 自由飞行空间机器人研究综述[J]. 机器人, 2002, 24(4): 380-384.  
Liu Chang'an, Li Guodong, Wu Kehe. Research summarizing of free flying space robot[J]. Robot, 2002, 24(4): 380-384.
- [4]Inaba N, Oda M. Visual servoing of space robot for autonomous satellite capture[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2003, 46(153): 173-179.
- [5]丁学恭. 机器人控制研究[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007: 7-9.
- [6]Guo Y S, Chin L. Adaptive neural network control for coordinated motion of a dual-arm space robot system with uncertain parameters[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2008, 29(9): 1131-1140.
- [7]Yildiz Y, Sabanovic A, Abidi K. Sliding-mode neuro-controller for uncertain systems[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2007, 54(3): 1676-1684.
- [8]Inaba N, Oda M. Visual servoing of space robot for autonomous satellite capture[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2003, 46(153): 173-179.
- [9]Walker M W. Adaptive control of space-based robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 7(6): 828-835.
- [10]Xu Y, Kanade T, Lee J J. Parameterization control of space and adaptive robot system[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(2): 435-451.
- [11]马保离, 霍伟. 空间机器人系统的自适应控制[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(2): 191-197.  
Ma Baoli, Huo Wei. Adaptive control of space robot system[J]. Control Theory and Application, 1996, 13(2): 191-197.
- [12]Shin J H, Lee J J. Dynamic control with adaptive identification for free-flying space robots in joint space[J]. Robotica, 1994, 12(6): 541-551.
- [13]Parlaktuna O, Ozkan M. Adaptive control of free-floating space robots in cartesian coordinates[J]. Advanced Robotics, 2004, 18(9): 943-959.
- [14]Gu Y L, Xu Y S. A normal form augmentation approach to adaptive control of space robot systems[J]. Dynamics and Control, 1995, 5(3): 275-294.
- [15]Chen B. A nonlinear  $H_\infty$  control design in robotic system under parameter perturbation and external disturbance[J]. International Journal of Control, 1994, 59(2): 439-446.
- [16]Choi Y, Chung W K, Youm Y. Robust control of manipulators using hamiltonian optimization[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, Apr. 20-25, 1997: 2358-2364.
- [17]Lee S H, Song J B, Choi W C, et al. Position control of a stewart platform using inverse dynamics control with approximate

- dynamics[J]. *Mechatronics*, 2003, 13: 605-619.
- [18] Slotine E J J, Li W P. On the adaptive control of robot manipulator[J]. *Robotica*, 1987, 6(3): 49-59.
- [19] Chu Z Y, Sun F C. Disturbance observer-based robust control of free-floating space manipulators[J]. *IEEE Systems Journal*, 2008, 2(1): 114-119.
- [20] 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[J]. *宇航学报*, 2007, 28(4): 914-919.  
Feng Baomin, Ma Guangcheng, Wen Qiyong. Design of robust intelligent controller for space robot in task space[J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(4): 914-919.
- [21] 王洪斌. 不确定性机器人轨迹跟踪鲁棒控制方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2005: 23-37.
- [22] 陈志勇, 陈力. 具有外部扰动及不确定系统参数的漂浮基空间机器人关节运动的增广鲁棒控制[J]. *空间科学学报*, 2010, 30(3): 275-282.  
Chen Zhiyong, Chen Li. Robust control for space-based robot with external disturbances and uncertain parameters in joint space[J]. *Journal of Space Science*, 2010, 30(3): 275-282.
- [23] 姜春福. 基于神经网络的机器人模型辨识与控制研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2003: 12-23.
- [24] 洪在地, 负超, 陈力. 漂浮基空间机器人及其柔性影响下逆模神经网络控制[J]. *宇航学报*, 2007, 28(6): 1509-1514.  
Hong Zaidi, Yun Chao, Chen Li. Inverse model neuro-control of free-floating space robot with rigid manipulators and rigid flexible manipulators[J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(6): 1509-1514.
- [25] Koningstein R, Cannon R H J. Experiments with model-simplified computed-torque manipulator controllers for free-flying robots[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1995, 18(6): 1387-1391.
- [26] Bhasin S, Dupree K, Patre P M, et al. Neural network control of a robot interacting with an uncertain viscoelastic environment[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 19(4): 947-955.
- [27] Kim Y H, Lewis F L. Neural network output feedback control of robot manipulators[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1999, 15(2): 301-309.
- [28] Jung S, Hsia T C. Robust neural force control scheme under uncertainties in robot dynamics and unknown environment[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2000, 47(2): 403-412.
- [29] Guo Y S, Chin L. Adaptive neural network control for coordinated motion of a dual-arm space robot system with uncertain parameters[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2008, 29(9): 1131-1140.
- [30] Sanner R, Vance E E. Adaptive control of free-floating space robots using neural networks[C]//Proceeding of American Control Conference, Seattle, Jun. 21-23, 1995: 2790-2794.
- [31] 谢箭, 刘国良, 颜世佐, 等. 基于神经网络的不确定性空间机器人自适应控制方法研究[J]. *宇航学报*, 2010, 31(1): 123-129.  
Xie Jian, Liu Guoliang, Yan Shizuo, et al. Study on neural network adaptive control method for uncertain space manipulator[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(1): 123-129.
- [32] 丰保民. 自由漂浮空间机器人轨迹规划与轨迹跟踪问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 67-81.
- [33] Feng W, Postlethwaite A. Simple robust control scheme for robot manipulators with only joint position measurements[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1993, 12(5): 490-496.
- [34] Sanner R M, Slotine T T E. Stable adaptive control of robot manipulator using neural networks[J]. *Neural Computation*, 1995, 7(4): 753-790.
- [35] Canudas D W C, Fixot N. Robot control via robust estimated state feedback[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1991, 36(12): 1497-1501.
- [36] Kim E. Output feedback tracking control of robot manipulators with model uncertainty via adaptive fuzzy logic[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy System* 2004, 12(3): 368-378.
- [37] Farzaneh A, Talebi H A, Rajnikant V P. A stable neural network-based observer with application to flexible-joint manipulators[J]. *IEEE Transactions on Neural Network*, 2006, 17(1): 118-130.
- [38] Kim Y H, Lewis F L. Neural network output feedback control of robot manipulators[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1999, 15(2): 301-309.