

# 考虑柔性关节的机械臂自适应运动控制策略研究

徐恩华<sup>1</sup>, 徐 燕<sup>2</sup>

(1. 广州民航职业技术学院 飞机维修工程学院, 广州 510403;

2. 广州民航职业技术学院 数学教学部, 广州 510403)

**摘要:** 具有柔性关节的轻型机械臂因其自重轻、响应迅速、操作灵活等优点, 取得了广泛应用; 针对具有柔性关节的机械臂系统的关节空间轨迹跟踪控制系统动力学参数不精确的问题, 提出一种结合滑模变结构设计的自适应控制器算法; 通过自适应控制的思想对系统动力学参数进行在线辨识, 并采用 Lyapunov 方法证明了闭环系统的稳定性; 仿真结果表明, 该控制策略保证了机械臂系统对期望轨迹的快速跟踪, 具有良好的跟踪精度, 系统具有稳定性。

**关键词:** 机械臂; 柔性关节; 自适应; 运动控制

## Adaptive Motion Control Strategy for Flexible-joint Robot Manipulators

Xu Enhua<sup>1</sup>, Xu Yan<sup>2</sup>

(1. School of Aircraft Maintenance Engineering, Guangzhou Civil Aviation College, Guangzhou 510403, China;

2. Department of Mathematics, Guangzhou Civil Aviation College, Guangzhou 510403, China)

**Abstract:** The light robotic manipulators with flexible joint has been widely used, because of the features of light weight, quick response and flexible operation. Aiming at trajectory tracking of flexible-joint robotic manipulator affected by systems dynamic parameter uncertainties, a adaptive motion control algorithm is proposed for flexible-joint robot manipulators based on synovial variable structure control method in this paper. According to the online identification of the system dynamics parameter adaptive control theory, the stability of the closed-loop system is proved by using Lyapunov method. The simulation results show that the control strategy can ensure the manipulator system tracking of the desired trajectory, has better tracking accuracy.

**Keywords:** robotic manipulator; flexible-joint; adaptive; movement control

## 0 引言

随着现代科学技术的发展, 机械臂已经广泛应用于工业制造、农业、医疗等领域<sup>[1-4]</sup>。其中柔性机械臂具有高负载/自重比、质量轻、功耗低等特色, 被普遍运用于各类挪动机械人平台上, 在空间摸索、军事侦查、反恐排爆和家庭办事等范畴占领愈来愈主要的位置。但是与传统的刚性机械臂相比, 柔性机械臂通常存在切向及轴向变形, 加之系统本身动力学的非线性、强耦合的特点<sup>[5-7]</sup>, 使柔性机械臂的高精度轨迹跟踪控制变得困难。

广义的柔性机械臂有两种: 一是机械臂连杆是弹性材料做成, 连杆本身存在柔性, 即分布式柔性机械臂; 二是机械臂连杆是刚性的, 柔性主要存在于关节处, 称为柔性关节机械臂。本文主要对柔性关节的情况进行研究。赵志刚等<sup>[8]</sup>针对具有柔性关节的空间机械臂系统, 考虑电机模型及扰动项, 建立了系统的二阶级联动力学方程, 然后设计了一种基于自抗扰控制的双闭环控制策略, 通过一个扩张状态观测器(ESO)对电机与负载扰动实时估计, 并在控制过程中对总扰动项进行补偿。孙敬颀等<sup>[9]</sup>对具有柔性关节的机械臂可能产生振动的情况, 设计

了一种基于谐波减速器的滑模控制器。基于微分几何反馈线性化方法对柔性关节模型做了精确线性化解耦处理。对于线性化后的系统, 为了克服不确定性及提高鲁棒性, 采用具有较高鲁棒性和抗干扰性的滑模变结构控制规律来实现轨迹的合理跟踪。安凯等<sup>[10]</sup>将柔性关节描述为单连杆机械臂和驱动电机的两个仿腱线弹簧, 利用 Euler-Lagrange 方法对系统进行建模, 结合滑模变结构控制, 给出了 Hurwitz 多项式的确定以及滑模控制器的设计方法, 并对 Hurwitz 多项式的根对控制性能的影响进行了分析。考虑到机械臂动力学参数的不确定性, 文献<sup>[11-14]</sup>采用神经网络算法或模糊逻辑系统对系统的非线性环节进行补偿, 并进一步设计控制器, 取得了良好的控制效果。

对机械臂的柔性关节, 其产生原因是由于机器人传动系统中大量运用谐波齿轮减速器和力矩传感器等传动机构, 这些元件都是具有柔性, 从而机器人关节处也具有柔性。柔性关节的存在对机器人的控制精度和性能有很大的影响和限制。所以, 在柔性机械臂的动力学建模和控制方法的研究中, 为了使机器人能够获得良好的性能, 必须重视机械臂关节处的柔性问题。本文对存在柔性关节的机械臂轨迹跟踪及控制问题进行研究, 考虑机械臂动力学参数不精确的情况, 根据自适应控制的思想对系统的动力学参数进行在线辨识, 同时结合滑模变结构控制设计控制器。

## 1 系统建模

本文仅考虑机械臂存在柔性关节的情况, 因此机械臂本体仍是刚性的。根据 Euler-Lagrange 建模方法, 可知机械臂本

收稿日期: 2017-01-05; 修回日期: 2017-02-21。

基金项目: 国家自然科学基金(11501139)。

作者简介: 徐恩华(1980-)男, 硕士, 浙江杭州人, 讲师, 主要从事电气自动化方向的研究。

通讯作者: 徐 燕(1981-)女, 博士, 讲师, 主要从事序列分析和模式识别方向的研究。



其中:  $\Gamma$  可以选取为正常数或任意的正定对角矩阵。  $Y_d^T(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r)$  为由  $q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r$  等元素组成的矩阵,  $r$  为滑模函数, 同时注意到  $r = \dot{q} - \dot{q}_r$ , 意也可以理解为机械臂实际速度  $\dot{q}$  与参考速度  $\dot{q}_r$  的偏差。式 (13) 描述了动力学参数估计值  $\hat{a}_d$  的更新机理, 即根据系统当前状态  $q, \dot{q}$ 、期望值  $\dot{q}_r, \ddot{q}_r$  以及误差  $r$  等, 依照系统特性进行在线识别。

定理 1: 对式 (5) (8) 组成的具有柔性关节的机械臂系统, 当参数自适应律取式 (13) 时, 控制器 (12) 能够可使系统稳定, 同时保证机械臂各关节对期望轨迹的跟踪误差收敛。

证明: 将控制器 (12) 带入系统额动力学方程 (5) (8), 可以得到:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = Y_d(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r)\hat{a}_d - Ar \quad (14)$$

利用机械臂动力学的归一化性质 (7)、辅助函数  $\dot{q}_r$  的定义 (11) 结合式 (14) 得到:

$$\begin{aligned} M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) &= Y_d(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r)\hat{a}_d - Ar = \\ Y_d(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r)a_d + Y_d(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r)\tilde{a}_d - Ar = \\ M(q)\ddot{q}_r + C(q, \dot{q})\dot{q}_r + g(q) + Y_d(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r)\tilde{a}_d - Ar = \\ M(q)(\ddot{q}_d - \alpha\dot{e}) + C(q, \dot{q})(\dot{q}_d - \alpha\dot{e}) + g(q) + \\ Y_d(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r)\tilde{a}_d - Ar \end{aligned} \quad (15)$$

式 (15) 可以改写为:

$$M(q)(\ddot{e} + \alpha\dot{e}) + C(q, \dot{q})(\dot{e} + \alpha\dot{e}) = Y_d(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r)\tilde{a}_d - Ar \quad (16)$$

为了方便后续证明, 将  $M(q), C(q, \dot{q})$  分别简写为  $M, C$ 。利用滑模函数  $r$  的定义, 式 (16) 可以简化为:

$$\dot{M}r = Y_d(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r)\tilde{a}_d - Ar - Cr \quad (17)$$

取 Lyapunov 函数为:

$$V = \frac{1}{2}r^TMr + \frac{1}{2}\tilde{a}_d^T\Gamma^{-1}\tilde{a}_d \quad (18)$$

对式 (18) 求导得到:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2}r^T\dot{M}r + r^T\dot{M}r + \tilde{a}_d^T\Gamma^{-1}\dot{\tilde{a}}_d = \\ \frac{1}{2}r^T\dot{M}r + r^TY_d(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r)\tilde{a}_d - r^TAr - r^TCr + \tilde{a}_d^T\Gamma^{-1}\dot{\tilde{a}}_d \end{aligned} \quad (19)$$

根据性质 (6), 有:

$$\frac{1}{2}r^T\dot{M}r - r^TCr = 0 \quad (20)$$

将参数自适应律 (13) 与式 (20) 带入 (19) 得到:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= r^TY_d(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r)\tilde{a}_d - r^TAr + \tilde{a}_d^T\Gamma^{-1}\dot{\tilde{a}}_d = \\ -r^TAr + r^TY_d(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r)\tilde{a}_d - \tilde{a}_d^TY_d^T(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r)r = \\ -r^TAr \leq 0 \end{aligned} \quad (21)$$

所以闭环系统是稳定的, 且时  $t \rightarrow \infty$  有  $r \rightarrow 0$ 。即系统的滑模函数将收敛于零。由于  $r = \dot{e} + \alpha\dot{e}$  同时  $\alpha$  为正数, 在此基础上进行微分方程求解, 可知当  $r$  收敛时, 系统的跟踪误差  $e$  能够沿滑模面  $r$  按指数收敛于零。证毕。

### 3 仿真实验

本节对所设计的控制策略进行验证。取如图 3 所示的平面两连杆机械臂为仿真对象, 其中,  $m_1, m_2, m_3$  分别为两个连杆及负载的质量,  $l_1, l_2$  分别为两个连杆的尺寸,  $l_1^g, l_2^g$  为质心距离。机械臂的各参数选取为:

$$m_1 = 4 \text{ kg}, m_2 = 3 \text{ kg}, l_1 = 1 \text{ m}, l_2 = 1 \text{ m}, l_1^g = 0.5 \text{ m}, l_2^g = 0.5 \text{ m}。$$

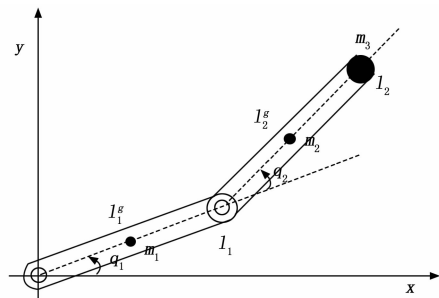


图3 机械臂柔性关节模型图

机械臂的期望轨迹选取为:

$$q_d = [\sin t, 0.5 \cos(2t)]^T$$

与传统PID方法进行对比, 笔者已经尽可能地调整PID参数, 以得到良好的控制效果。得到的对比误差曲线如图4、5所示。若采用PID控制, 在误差收敛过程中产生了明显的超调(关节一0.15 rad, 关节二0.05 rad), 且稳态跟踪精度较低(关节一、关节二均约0.02 rad); 采用本文所涉及的控制算法, 几乎没有超调量, 且系统能够保持很高的跟踪精度(关节一、关节二均约0.001 rad)。

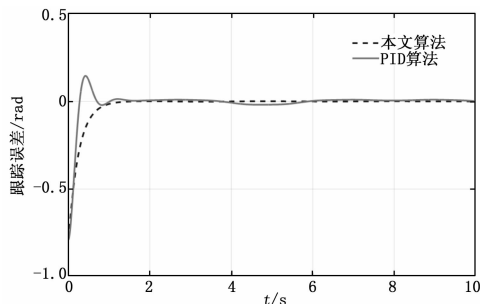


图4 关节一跟踪误差对比

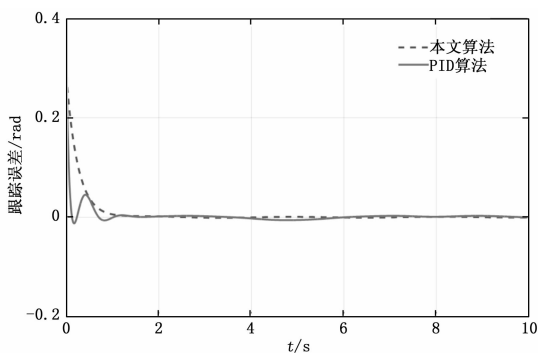


图5 关节二跟踪误差对比

### 4 结论

针对柔性关节机械臂的关节空间轨迹跟踪问题, 通过对柔性关节进行合理假设, 结合机械臂本体动力学建立系统的完整动力学方程, 设计了一种基于滑模变结构的自适应轨迹跟踪控制器, 对系统不精确的动力学参数进行在线辨识, 采用 Lyapunov 方法证明了系统的稳定性。

#### 参考文献:

- [1] 蒋 刚, 龚迪琛, 蔡 勇, 等. 工业机器人 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2013.
- [2] 韩清凯, 张 昊, 任云鹏, 等. 机器人和机械手控制系统 [M]. 北

京：国防工业出版社，2014.

[3] 史先鹏，刘士荣. 机械臂轨迹跟踪控制研究进展 [J]. 控制工程，2011，18（1）：116-122.

[4] 席雷平，陈自力，张世华. 改进幂次趋近律的机械臂滑模控制律设计 [J]. 计算机测量与控制，2012，20（2）：380-391.

[5] 刘才山，刘又午，王建国. 柔性机械臂的动力学模型及滑模变结构控制 [J]. 振动与冲击，1998，1：24-29.

[6] 席雷平，陈自力，齐晓慧，等. 基于新型滑模面的机械臂快速轨迹跟踪滑模变结构控制 [J]. 军械工程学院学报，2012，24（3）：36-40.

[7] 陈玄. 基于模糊控制下多自由度机械手臂控制技术的研究 [D]. 太原：中北大学，2014.

[8] 赵志刚，田浩，赵阳. 空间机械臂柔性关节轨迹跟踪自抗扰控制 [A]. 中国自动化学会控制理论专业委员会 A 卷 [C]. 2011.

[9] 孙敬颀，史士财，王学飞，等. 大型空间机械臂柔性关节的微分几何算法控制器设计 [J]. 哈尔滨工程大学学报，2012，33（11）：1371-1376.

[10] 安凯，王飞飞. 一种单连杆机械臂柔性关节的滑模变结构控制 [J]. 现代电子技术，2016，39（2）：4-8.

[11] 杨晓峰，陈劲杰，易灵君. 四自由度机械臂运动控制系统的研究 [J]. 计算机测量与控制，2013，21（4）：959-964.

[12] 洪昭斌，陈力，李文望. 柔性臂杆、柔性关节空间机械臂 T-S 模糊轨迹跟踪及双柔振动并行综合控制 [J]. 中国机械工程，2016，27（15）：2020-2026.

[13] 顾义坤，倪风雷，刘宏. 基于 RENN 的柔性关节机械臂自适应动态面控制 [J]. 控制与决策，2011，26（12）：1783-1790.

[14] 陈志勇，陈力. 柔性关节空间机械臂基于模糊理论的关节运动控制器设计 [A]. 全国航天动力学与控制学术会议 [C]. 2011.

[15] Lewis F L, Dawson D M, Abdallah C T. Robot Manipulator Control: Theory and Practice [M]. Marcel Dekker, 2004.

[16] 刘德满，刘宗富. 机器人自适应控制——计算力矩法 [J]. 机器人，1989，6：1-5.

getByName（）方法解析为无线路由器的公网 IP 地址，并在代码中通过 Socket（“IP 地址”，4567）指定无线路由器的公网 IP 地址和为 WIFI 模块配置的端口号，待 WIFI 模块的服务器启动后，手机端通过 TCP 协议与服务器建立连接，通过输入输出流进行数据的发送和接收，最终实现手机端软件与 Zig-Bee 无线传感器网络之间的数据交换。手机监控软件作为终端控制中心，还具有数据的存储、查询和发出控制指令等功能，监控软件的程序流程如图 4 所示。

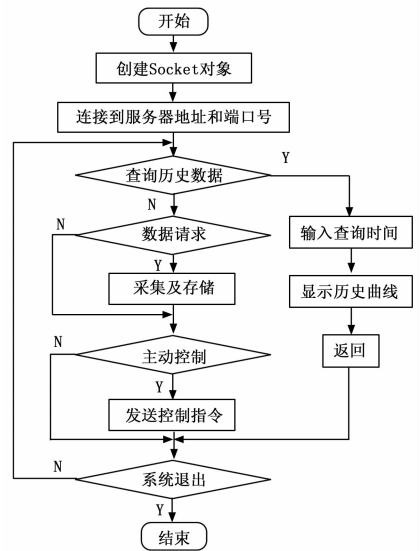


图 4 上位机监测软件程序流程

## 4 系统测试

经过前期各模块功能的分别开发后，对整个系统进行综合测试。采用一个协调器节点和 3 个传感器节点组成无线传感器网络，在传感器节点上设置温湿度、光强和烟雾传感器，协调器采用外部 5 V 电源供电，传感器节点采用 3 节 5 号电池供电。此时启动协调器，待网络指示灯稳定后，依次打开 3 个传感器节点，协调器上的 LCD 可以实时显示 3 个传感器节点的环境参数信息，并以 30 s 为周期更新数据。

确保无线传感器网络工作正常后，将协调器与设置好的

## 5 结论

通过上述测试，本文设计的远程环境无线监控系统，能够通过 ZigBee 无线传感器网络对环境参数进行实时、有效的采集和稳定、可靠的传输，并借助 WIFI 模块和路由器实现远程监控的目的；通过手机端的监控软件可在任何有网络连接的位置查看监测结果和下发控制指令，完成对环境状态的反馈控制。该系统的功能可使人对智能家居的管理和控制变得更加灵活和方便。

### 参考文献：

[1] 赵丽. 基于 ZigBee 技术的智能家居系统研究与设计 [D]. 南京：南京邮电大学，2011.

[2] 许毅，陈立家，甘浪雄，等. 无线传感器网络技术原理及应用 [M]. 北京：清华大学出版社，2015.

[3] 高键，方滨，尹金玉. ZigBee 无线通信网络节点设计与组网实现 [J]. 计算机测量与控制，2008，16（12）：1912-1914.

[4] 高德欣，刘芳，张如耀. 基于 Android 的轮胎模具仓库温湿度无线监控系统设计 [J]. 自动化与仪表，2016，31（4）：30-33.

[5] 朱璉，杨占勇. 基于 CC2530 的无线振动监测传感器节点设计 [J]. 仪表技术与传感器，2012，44（8）：56-58，83.

[6] 王玉洁，桑永胜. 一种基于 ZigBee 物联网技术的校园安防解决方案 [J]. 现代计算机，2012，29（3）：33-38.

[7] 朱向庆，陈志雄. 远程分布式温湿度实时监测系统的设计 [J]. 计算机测量与控制，2010，18（1）：55-57+63.

[8] 尹士龙. 基于 ZigBee 网络的手机位置共享系统设计 [D]. 成都：电子科技大学，2009.