

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.03.010

基于混合控制的机械臂定位和振动控制研究

王晓军, 王宇嘉

(上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

摘 要:针对柔性机械臂的定位和振动控制,设计了一种基于带尾部信号的时滞滤波器的混合闭环控制方案。滤波器的设计采用系统输出等于系统参考值的幅值的约束条件,有效地减小了机械臂的定位调节时间;同时综合考虑柔性关节的振动模态,设计出时间最优的时滞滤波器,进一步消除柔性关节的残留振动,显著提高了定位效率。仿真结果证明了该方案的有效性能,能够同时实现机械臂柔性关节的快速定位以及振动控制,有利于作业效率的进一步提高。

关 键 词:柔性机械臂;时滞滤波器;定位控制;振动控制

中图分类号:TP271

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2017)03-0045-04

Positioning and Vibration Control of Robot Manipulator Based on Hybrid Control

WANG Xiaojun, WANG Yujia

(School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620)

Abstract: Aiming at positioning and vibration control of flexible robot manipulators, a hybrid close-loop control scheme based on time-delay filter with tail was proposed. The design of time-delay filter was based on the amplitude constraints of system output equal to reference value. The approach reduced the positioning time efficiently. Considering the vibration mode of the manipulator, the designed filter also eliminated the residual vibration. Simulation results prove the effectiveness of this proposed approach, achieve the fast positioning and vibration control of flexible joint, and further enhance the working efficiency.

Keywords: flexible robot manipulator; time-delay filter; positioning control; vibration control

轻型机械臂被广泛地应用于很多高性能工业场合,如空间飞船及柔性制造等领域。为了加快作业效率并减少能耗,轻型材料的使用越来越普遍。然而材料的轻量化容易导致产生振动模态,不利于机械臂的精确定位^[1]。除了精心设计柔性系统的硬件结构,很多学者选择闭环控制系统来抑制机械臂末端的残留振荡^[2-3];而输入整形技术作为一种前馈最优控制,简单易行,同样受到了广泛关注。一些学者对满足实际约束的时间最优控制进行了研究。文献[4]提出了一种新的残留振荡计算表达式来增强对频率和阻尼变化的鲁棒性。文献[5]设计了一种负脉冲输入整形器来进一步减小系统响应时间。为了增加对模型误差的鲁棒性,一些学者选择了鲁棒性更好的时间最优控制命

令^[6-8]。文献[9]则针对含有零点的系统设计了带有尾部信号约束的最优时滞滤波器。但是,原有滤波器的设计是基于阶跃系统输入,设计过程依赖于系统的输出值,而且单独的时滞滤波器属于前馈控制,无法有效抑制外部干扰。

基于以上分析,针对柔性机械臂的定位和控制,作者设计了一种基于带尾部信号时滞滤波器结合比例微分控制器(PD)的混合闭环控制方案,采用系统输出等于系统参考值的约束条件,设计出新的带尾部信号的时滞滤波器。该滤波器可以有效地减小机械臂定位响应时间,而且综合振动模态对消约束条件,设计的滤波器可以同时实现机械臂柔性关节的快速定位以及残留振动控制。

收稿日期:2016-09-23;修回日期:2017-01-13

第一作者简介:王晓军(1978),男,河北秦皇岛人,博士,高级工程师,主要研究方向为过程建模与控制、智能控制、柔性机械系统振动控制等。E-mail:justin.xjwang@163.com

1 数学模型

选择文献[10]中的单关节柔性机械臂作为控制对象。则有:

$$M \ddot{q} + G(q) - K(\theta - q) = 0;$$

$$J \ddot{\theta} + K(\theta - q) + F_\tau = m_\tau.$$

式中: θ 和 q 分别表示电机和连杆的角位置; M 和 J 分别表示连杆和电机端的有效转动惯量; K 表示关节的刚度; G 表示关节的重力项; m_τ 表示电机端的输出力矩; F_τ 表示电机端的摩擦力。

以柔性关节变形 $\delta = \theta - q$ 为输出,并忽略重力项,可以得到简化的柔性关节模型:

$$M \ddot{\delta} + K \delta = M \ddot{\theta},$$

传递函数形式为:

$$\frac{\delta(s)}{a_\theta} = \frac{1}{s^2 + \frac{K}{M}}. \quad (1)$$

式中, a_θ 表示柔性关节的角加速度。

2 控制方案

对柔性关节的控制采用基于时滞滤波器结合 PD 控制器的混合闭环控制方案,如图 1 所示。其中,闭环定位控制器采用比例微分控制(PD),时滞滤波器位于闭环控制器之外,除了可以缩短定位时间,还可以综合考虑系统的振动模态,消除机械臂的残留振动。

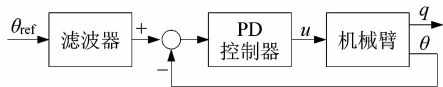


图 1 控制框图

Figure 1 Control structure

基于 PD 控制,可得电机角位置 θ 的闭环传递函数:

$$\frac{\delta(s)}{\theta_{ref}(s)} = \frac{K_d s + K_p}{s^2 + K_d s + K_p}. \quad (2)$$

式中: K_p, K_d 分别为 PD 控制器的比例系数和微分系数; θ_{ref} 为电机角位置参考值。

结合公式(1),可以得到关节输出变形对电机角位置参考值的传递函数:

$$\frac{\delta(s)}{\theta_{ref}(s)} = \frac{s^2 (K_d s + K_p)}{(s^2 + K_d s + K_p)(s^2 + \omega_n^2)}.$$

式中,关节输出变形的振动角频率 $\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}$ 。

3 时滞滤波器设计

3.1 时滞滤波器的形式

对于给定的带有零点的系统 $G(s)$,阶跃输入信号

通过时滞滤波器 $D(s)$,可以产生控制信号 $U(s)$ 。带尾部信号的时滞滤波器表示为:

$$D(s) = sU(s) = \sum_{j=0}^n a_j e^{-st_j} + e^{-st_n} \sum_{j=1}^r \frac{c_j s}{s - z_j}.$$

式中,系统零点的个数 r 和零点值 z_j 是已知参数,而未知参数除了脉冲切换时间的个数 n 、脉冲切换时间 t_j 以及尾部信号参数 c_j 外,还有脉冲幅值 a_j ,其中 t_n 为脉冲时间。

3.2 零极点对消约束条件

零极点对消约束条件为:

$$\left(\sum_{j=0}^n a_j e^{-st_j} + e^{-st_n} \sum_{j=1}^r \frac{c_j s}{s - z_j} \right) \Big|_s = p_i = 0.$$

式中, p_i 为系统极点。

为了保证设计的时滞滤波器的时间最优性能,在此考虑对消关节输出变形的柔性极点。

3.3 新的滤波器约束条件

一般滤波器约束条件首先要满足滤波器切换时间初始值为零:

$$t_0 = 0.$$

其次,如图 1 所示,由于本方案采用了关节角位置的闭环控制,所以需要满足新的滤波器约束条件,即电机角位置输出可以跟踪参考输入,即

$$\theta(s) = \theta_{ref}(s).$$

3.4 求取最优解

滤波器设计的优化目标为脉冲时间 t_n 最小,即满足

$$t_n = \min(t_{n1}).$$

4 应用仿真^[11-12]

为了验证本文方案的有效性,针对式(1)和式(2)的机械臂柔性关节数学模型,进行柔性关节的定位和振动控制仿真研究。

仿真中,PD 控制器参数为 $K_p = 0.2, K_d = 0.6$;柔性关节参数 $K = 68.236 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}; M = 0.18573 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。则系统包含实数零点 $s = -0.333$,复数极点 $s = -0.3 \pm 0.332i$ 和柔性复数极点 $s = \pm 19.2i$ 。

由于系统传递函数包含 4 个极点,假设时滞滤波器的脉冲切换次数为 5,即 $n = 4$,则滤波器的 Laplace 形式为:

$$D(s) = \sum_{j=0}^4 a_j e^{-st_j} + e^{-st_4} \frac{c_1 s}{s - z_1}.$$

根据上述的滤波器设计约束条件,利用 MATLAB 优化工具箱可以得到滤波器为:

$$D(s) = 0.33 + 0.3259e^{-0.1939s} + 0.3441e^{-5.0143s} -$$

$$\frac{0.158s}{s + 0.333} e^{-5.0143s} \quad (3)$$

由式(3)可见,经过优化后得出的滤波器的脉冲切换次数为3,即 $n = 2$ 。

为了便于比较,首先给出没有时滞滤波器的情况下,柔性关节在PD控制下的定位和振动控制结果,如图2所示。图中假设关节给定位置为10 rad,由图可见,即使关节位置经过一定的调节时间可以到达给定位置之后,关节变形仍旧出现了高频等幅振动,不利于快速精确定位的实现。

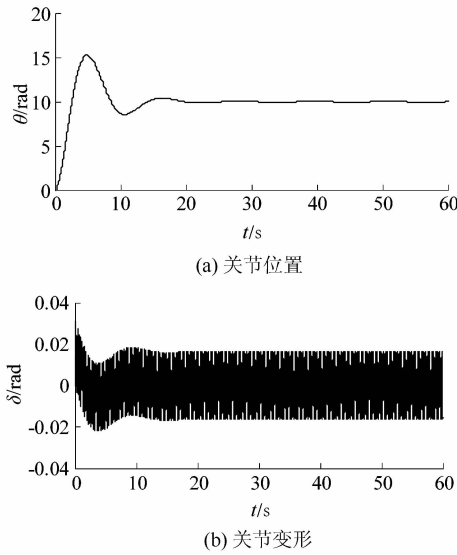


图2 无滤波器的关节位置及关节变形输出

Figure 2 Joint angle and joint deviation output without filter

采用基于时滞滤波的控制方案,关节的定位以及振动控制效果如图3所示。和图2对比可以发现,在本文的控制方案下,关节可以很快地到达给定位置,与此同时,关节的变形振动基本消除,即连杆角位置可以迅速地跟上电机角位置,有助于定位效率的提高。

本文的滤波器的设计综合考虑了系统的定位模态和振动模态,如公式(3)所示。为了进一步说明该时滞滤波器的有效性,和文献[13]中采用的串级控制方案进行比较。

如采用串级控制方案,首先针对定位控制,公式(2)滤波器的设计为:

$$D(s) = 0.6556 + 0.3444e^{-4.9161s} - \frac{0.158s}{s + 0.333} e^{-4.9161s}$$

根据公式(1)单独设计零振荡时滞滤波器消除系统振动,得

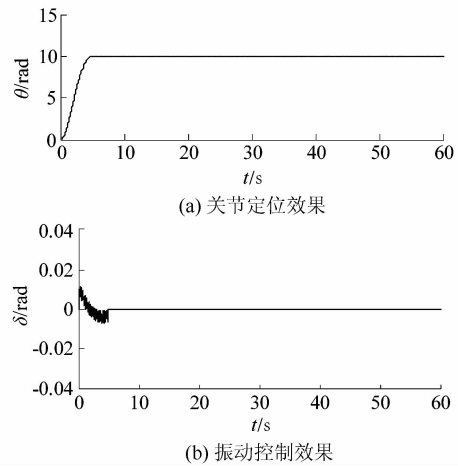


图3 基于时滞滤波控制方案的关节定位和振动控制效果

Figure 3 Effect of joint angle and vibration control based on time delay filter control scheme

$$D_2(s) = 0.5 + 0.5e^{-0.1639s}$$

则文献[13]的串级方案下的滤波器为

$$D(s) = D_1(s)D_2(s) = 0.3278 + 0.3278e^{-0.1639s} + 0.1722e^{-4.9161s} - \frac{0.079s}{s + 0.333} e^{-4.9161s} + 0.1722e^{-5.08s} - \frac{0.079s}{s + 0.333} e^{-5.08s} \quad (4)$$

和公式(3)比较可以发现,公式(4)的滤波器形式更为简洁,而且滤波器时间稍有减小:由5.0143 s减小到5.0800 s。

本文所选方案的时滞滤波器滤波后的关节给定位置以及与未滤波的关节给定位置对比效果,如图4所示。对比可以发现,滤波后的参考位置已经不是阶跃信号,变为分段式的较为平滑的参考信号。

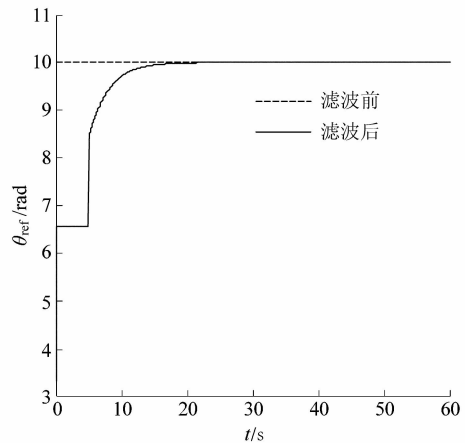


图4 关节参考位置对比

Figure 4 Joint reference position comparison

5 结语

文中针对柔性机械臂的定位和振动控制,提出了一种基于时滞滤波器的混合闭环控制方案。带尾部信号的时滞滤波器的设计中利用了系统输出等于系统参考输入的幅值约束条件,并综合考虑机械臂柔性关节的振动模态,可以设计出时间最优的带尾部信号时滞滤波器。该滤波器可以减小系统定位响应时间的同时,进一步消除柔性关节的残留振动,有利于作业效率的进一步提高。仿真结果证明了该方案的良好性能。

参考文献:

- [1] PEREIRA E, TRAPERO J R, DIAZ I M, et al. Adaptive input shaping for single-link flexible manipulator using an algebraic identification [J]. Control engineering practice, 2012, 20(2): 139–147.
 - [2] AN Fang, CHEN Weidong, SHAO Minqiang. Dynamic behavior of time-delayed acceleration feedback controller for active vibration control of flexible structures [J]. Journal of sound and vibration, 2014, 333(20): 4789–4809.
 - [3] FELIU V, PEREIRA E, DIAZ I M, et al. Passivity-based control of single-link flexible manipulators using a linear strain feedback [J]. Mechanism and machine theory, 2014, 71: 191–208.
 - [4] KANG Chui-goo, KWAK Jung-han. On a simplified residual vibration ratio function for input shaping control [J]. Asian journal of control, 2014, 16(1): 277–283.
 - [5] 赵志刚, 游斌弟, 赵阳. 改进型负输入整形与最优控制结合的振动抑制方法 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(8): 202–208.
 - [6] PAI Mingchang. Closed-loop input shaping control of vibration in flexible structures via adaptive sliding mode control [J]. Shock and vibration, 2015, 19(2): 221–233.
 - [7] LIU Keping, ZENG Jianping, YANG Min, et al. Design of multi-stage optimal arbitrary time-delay filter [J]. Applied mechanics and materials, 2013, 397/398/399/400: 1510–1514.
 - [8] HAN Jianda, ZHU Zhiqiang, HE Yuqing, et al. A novel input shaping method based on system output [J]. Journal of sound and vibration, 2015, 335(6): 338–349.
 - [9] TUTTLE T D, SEERING W P. Creating time-optimal commands with practical constraints [J]. Journal of guidance control and dynamics, 1999, 22(2): 241–250.
 - [10] 熊根良. 具有柔性关节的轻型机械臂控制系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 100–102.
 - [11] 刘业超, 倪风雷, 姜力, 等. 基于关节力矩的柔性关节机器人的控制策略 [J]. 传感器与微系统, 2008, 27(11): 117–120.
 - [12] 戎新萍, 张得礼, 王小平. 基于解耦的柔性关节机械臂振动抑制方法研究 [J]. 机电工程, 2015, 32(1): 14–20.
 - [13] 王晓军. 一种新的正幅值带尾部信号的时滞滤波器设计 [J]. 中国机械工程, 2010, 21(10): 1153–1156.
-
- (上接第44页)
- [3] TAPUS A, MATARIC M J, SCASSELLATI B. The grand challenges in socially assistive robotics [J]. IEEE robotics and automation magazine, 2007, 14(1): 34–42.
 - [4] DILLOW C. Children's hospital boston sends telepresence robots home with post-op patients [EB/OL]. (2013-02-01) [2016-12-10]. <http://www.popsci.com/technology/article/2011-12/childrenshospital-boston-turns-telepresence-robots-post-op-patient-care>.
 - [5] LI Yanfei, LIU Meiqin, SHENG Weihua. Indoor human tracking and state estimation by fusing environmental sensors and wearable sensors [C]//The 5th Annual IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Shenyang: IEEE, 2015: 1468–1473.
 - [6] ROS WIKI. Webpage [EB/OL]. (2015-12-01) [2016-12-10]. <http://www.ros.org/wiki/>.
 - [7] THRUN S, BURGARD W, FOX D. Probabilistic robotics (intelligent robotics and autonomous agents) [M]. Cambridge, USA: MIT Press, 2005.
 - [8] CHOSET H, PIGNON P. Coverage path planning: the boustrophedon cellular decomposition [C]//International Conference on Field and Service Robotics. London: Springer, 1998: 203–209.
 - [9] HOMAIFAR A, GUAN S, LIEPINS G E. Schema analysis of the traveling salesman problem using genetic algorithms [J]. Complex systems, 1992, 6(2): 533–552.
 - [10] GREFENSTETTE J J, GOPAL R, ROSMAITA B, et al. Genetic algorithm for travelling salesman problem [C]//Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications. Pittsburgh, PA: Psychology Press, 1985: 160–168.
 - [11] TANG Lixin. Improved genetic algorithms for TSP [J]. Journal of northeastern university (natural science), 1999, 20(1): 40–42.
 - [12] YAP P. Grid-based path-finding [C]//Advances in Artificial Intelligence. Berlin: Springer-Verlag, 2002: 44–55.
 - [13] XIN Yu, LIANG Huawei, DU Mingbo, et al. An improved A* algorithm for searching infinite neighbourhoods [J]. Robot, 2014, 36(5): 1220–1224.