

文章编号: 1001-0920(2008)01-0099-04

基于遗传优化的水平欠驱动机械臂分层滑模控制

林 壮, 朱齐丹, 邢卓异

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对二自由度水平欠驱动机械臂系统, 提出一种基于等效控制理论和李雅普诺夫反馈函数法的分层滑模变结构控制方法. 同时, 为解决由于欠驱动系统控制缺少通用的参数计算方法而产生控制精度低的问题, 提出了针对水平欠驱动系统的遗传算法在全局参数空间进行全参数寻优的改进控制方法. 仿真结果表明了该方法的有效性, 并且优化后的控制器具有较好的适应性和控制效果.

关键词: 机械臂; 欠驱动系统; 滑模控制; 遗传算法

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Hierarchical sliding mode control for horizontal underactuated manipulators with optimization based on GA

LIN Zhuang, ZHU Qi-dan, XING Zhuo-yi

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China. Correspondent: LIN Zhuang, E-mail: linzhuang@tom.com)

Abstract: Based on the equivalent control method and Lyapunov feedback function law, a hierarchical variable structure sliding mode controller is proposed for a two-DOF horizontal underactuated manipulators. And because the system lacks universal parameters selection measures, an improved method based on genetic algorithm and optimized all parameters in global parameters space for the horizontal underactuated system is presented to solve the low control precision problem. The simulation results show the effectiveness of the method, and the optimized controller has better adaptability and control effects.

Key words: Robot manipulators; Underactuated system; Sliding mode control; Genetic algorithm (GA)

1 引 言

近年来, 欠驱动机械系统已成为国内外学者广泛研究的科研课题. 由于该系统的特点是输入空间(即控制空间)维度小于构造空间维度, 使其不满足 Brockett 关于光滑反馈镇定的必要条件, 难以用一般的反馈方法进行控制. 通常采用非光滑控制器和时变光滑控制器或两者的混合控制方法.

文献[1, 2]分别给出一种可应用于欠驱动系统的分层滑模变结构控制器. 但文献[3]却证明, 文献[1]中的总控制输入不能保证子系统的滑模表面的稳定性, 滑模控制的抗扰性可能会由此变弱; 而文献[2]提出的解耦模糊滑模控制器, 虽然满足子系统滑模表面稳定性要求, 但却没有用严格的理论证明其有效性.

文献[3]提出了一种针对 Pendubot 的稳定滑模控制方法, 其重要意义在于这一方法不仅确保了系统的滑模稳定性, 而且同时具有很好的抗扰性. 然而该文并没有解决通用参数计算方法和系统优化的问题, 仅给出了一种约束条件并证明其可以保证系统稳定. 而且类似 Pendubot 这一类的欠驱动系统, 因其只需要实现系统的动态平衡, 相比较于要实现定点控制(如零速启动, 到达目标零速停止)的水平欠驱动机械臂系统而言, 其控制目标相对容易实现.

文献[4]证明, 对于水平欠驱动机械臂系统, 由于没有重力的存在, 使稳定的控制方法设计更加困难. 可见, 类似文献[1-3]的滑模控制理论和试凑参数的设计方法对本文研究对象并不适用. 对此, 本文提出一种适用于水平欠驱动系统的分层滑模控制及

收稿日期: 2006-10-10; 修回日期: 2007-01-26.

基金项目: 国家人事部出国留学人员基金项目(IA200004).

作者简介: 林壮(1978—), 男, 哈尔滨人, 博士生, 从事非线性控制、欠驱动系统的研究; 朱齐丹(1963—), 男, 哈尔滨人, 教授, 博士生导师, 从事非线性控制、智能控制等研究.

对其全部参数进行全局遗传优化的方法,以实现对其二自由度水平欠驱动机械臂的有效控制,解决了因系统的复杂性以及多重约束带来的设计难度和稳定控制问题.

2 水平欠驱动机械臂数学模型

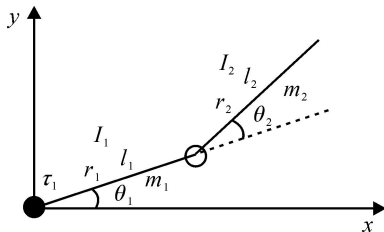


图1 二连杆机械臂模型

考虑标准假设形式,如无摩擦等.图1给出了二连杆机械臂的模型.其中: m_1, m_2 是连杆1和连杆2的质量; θ_1 是连杆1相对水平位置(假设水平位置为系统两臂伸直 $\theta_1 = \theta_2 = 0$ 的初始状态,即 x 轴)的角度; θ_2 是连杆2相对连杆1的角度; l_1 和 l_2 是连杆1和连杆2的长度; r_1 和 r_2 是连杆1和连杆2的长度的二分之一; I_1 和 I_2 是连杆1和连杆2相对于其质心的转动惯量; τ_1 是系统的外加控制输入量.系统的控制空间是 $Q = S^1 \times S^1$,参变量的坐标是 $q = (\theta_1, \theta_2)$,可得系统的动力学方程为

$$A(q) \ddot{q} + h(q, \dot{q}) = \tau \quad (1)$$

其中: \dot{q} 和 \ddot{q} 分别是广义速度和广义加速度,向量 $h(q, \dot{q}) \in R^2$ 包括系统中的向心力和向心加速度部分(科里奥利力),水平系统意味着忽略重力部分.式(1)可写成

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} a_{11} &= I_1 + I_2 + m_1 r_1^2 + m_2 (r_1^2 + r_2^2) + 2m_2 l_1 r_2 c_2, \\ a_{12} &= a_{21} = I_2 + m_2 r_2^2 + m_2 l_1 r_2 c_2, \\ a_{22} &= I_2 + m_2 r_2^2, \\ h_1 &= -2m_2 l_1 r_2 s_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - m_2 l_1 r_2 s_2 \dot{\theta}_2^2, \\ h_2 &= m_2 l_1 r_2 s_2 \dot{\theta}_1^2, \\ s_2 &= \sin \theta_2, c_2 = \cos \theta_2. \end{aligned}$$

3 分层滑模控制器设计与稳定性证明

令 $x_1 = \theta_1, x_2 = \dot{\theta}_1, x_3 = \theta_2, x_4 = \dot{\theta}_2$,式(2)便可转换为标准单输入多输出的非线性系统^[3].将状态变量组 (x_1, x_2) 和 (x_3, x_4) 看成标准形式的两个子系统,定义总滑模表面和子滑模表面为

$$\begin{aligned} s_1 &= c_1 x_1 + x_2, s_2 = c_2 x_3 + x_4, \\ S &= \hat{\alpha}_1 s_1 + \hat{\alpha}_2 s_2. \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $c_1, c_2, \hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2$ 为正常数.由文献[3]的相关结

论,即可得到相应的总控制输入^[5].

由于渐近稳定的系统一定会到达滑模表面,对各滑模面的渐近稳定性证明便从另一方面保证了系统的稳定可控性^[3,5].这里,系统滑模面渐近稳定性证明与文献[3]的定理1和定理2基本一致,所以在此不再赘述而仅指出其不同之处.

文献[3]指出,对于欠驱动系统,如Pendubot机械臂,由于其具有不稳定的平衡点使其必须满足如下相关条件:

$$\hat{\alpha}_1 = \begin{cases} +\alpha_0, s_1 \cdot s_2 = 0, & \alpha_0 > 0, \\ -\alpha_0, s_1 \cdot s_2 < 0, & \end{cases} \quad (4)$$

便可保证子滑模表面在任何情况下都是渐近稳定的.实际上,对于水平欠驱动机械臂而言,虽然其结构类似于Pendubot机械臂,但因没有重力的影响,系统的平衡点是稳定平衡点.所以式(4)的约束条件在这种情况下可以忽略^[5].于是,在文献[3]的基础上可简化证明为:

由 $S = L_1, \dot{S} = L_2, \ddot{S} = L$ 可得 $s_1 = L_1, s_2 = L_2, \dot{s}_1 = L_3, \dot{s}_2 = L_4$ ^[3,5].进而得到

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} s_1^2 dt &= \int_0^{\infty} |s_1|^2 dt < \infty \\ \int_0^{\infty} s_2^2 dt &< \infty \end{aligned} \quad (5)$$

同理可得 $\int_0^{\infty} s_2^2 dt < \infty$.根据 $s_1 = L_3, s_2 = L_4, \dot{s}_1 = L_4, \dot{s}_2 = L_5$ 以及上面结论,由Babartat引理便可得到结论:系统的所有滑模表面不仅是李雅普诺夫意义下稳定的,而且还是渐近稳定的,这说明控制器能在有限时间内使系统到达滑模表面并最终稳定在目标位置上.

4 基于遗传算法的全参数优化

在优化设计中,设计变量、目标函数(性能指标)的选取以及约束条件的处理是3个重要因素^[6].通过合理的编码,将设计变量转化为适于群体进化的表达形式;对于目标函数(性能指标)进行处理,使其转化为单调的适应度函数,使群体进化过程中适应度值可以反映优化模型的状态并通过判别适应度值来确定最优解;而约束条件的处理对于遗传算法的成功运用起到至关重要的作用.

4.1 变量及适应度函数设计

本文针对分层滑模变结构控制的特点选取待优化参数为总滑模平面构成参数 $\hat{\alpha}_1$ 和 $\hat{\alpha}_2$,子滑模平面构成参数 c_1 和 c_2 ,以及切换参数 W 和 K .定义优化参数向量为 $X = [\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, c_1, c_2, W, K]$.经研究表明,在一般的可行解参数组合情况下,前半段运行时间里系统不会出现大的超调或发散问题,而优化目标是解决系统趋近稳态时的抖振和误差问题.所以对

前半部分运行未加以评估,而是在约束条件处理中加入相应办法以解决超调过大等问题.同时,为建立综合评价各项性能指标的适应度函数,采用权重系数组合法构造系统控制器的适应度函数,即

$$f = W^T \cdot s, \quad (6)$$

$$W^T = [w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7],$$

$$s = [\bar{e}_{1p}, \bar{e}_{1n}, \bar{e}_{2p}, \bar{e}_{2n}, \bar{v}_1, \bar{v}_2, \bar{u}_{total}]^T.$$

其中: W^T 为权重系数矩阵,相应地调整 W^T 中分量的大小可以改变优化的重点; s 的等号右侧从左到右为:驱动臂和非驱动臂的正负角度误差、角速度及控制器输入的绝对值在仿真过程中的平均值.

4.2 遗传操作和约束条件的处理

4.2.1 复制操作

采用排序选择法辅以最佳个体保存法.在采取排序选择之前先找出当前群体中适应度最高和最低的 2 个个体,然后直接抛弃最差的 2 个个体,再将最优秀的 2 个个体直接复制到下一代群体之中.然后再对去掉 2 个最差个体的当前群体按照预先设定好的概率表进行排序之后,再进入选择、交叉和变异的遗传操作阶段.采用这种二者配合的复制操作法,既可在一定程度上避免概率表存在不合理分配时的影响,又可减少因最佳个体法保留最佳个体直接复制而导致的潜在局部最优发生率变高的可能性.

4.2.2 交叉操作

采用非一致时变概率算术交叉.算术交叉^[6]在搜索初期具有较其他方法更快的搜索速度,但也存在不利于发挥交叉所应具有的对父代搜索空间的继承特性,使算法在搜索后期未成熟收敛的发生概率变大的缺点.同时,在进化初期通常希望交叉概率较高,不至于过早收敛,而随着代数的增加,个体的进化逐步趋近最优解,大量交叉反而易产生不可行个体,此时减小交叉概率可缩短算法的收敛时间,提高算法运行效率.因此本文采用作用于个体分量的基于时变交叉概率的非一致算术交叉操作.这种交叉操作既具有非一致算术交叉的搜索运算速度快的优点,又可以通过时变概率避免固定交叉概率带来的优化效果不稳定问题.交叉概率为

$$crossover = w \cdot \frac{total_gens}{cur_gen}. \quad (7)$$

其中: cur_gen 和 $total_gens$ 代表当前进化代数和总的进化代数; w 是权重值,范围为 $0.01 \sim 0.015$.

4.2.3 变异操作

采用时变的非均匀变异.经过本文大量仿真实验发现,优化的对象是属于典型的解空间里存在多个局部最优空间的情况.为避免在采用非均匀变异操作加强对局部重点空间搜索时陷入局部最优空间

的问题,本文采用时变的变异概率:在进化初期,通过相对较大的变异概率可使进化跳出局部最优的限制;而在后期,变异幅度随着迭代次数的增加而减小,可减少在迭代后期产生过多不可行个体的问题.其时变概率的形式类似于式(7),但 w 的取值范围为 $0.0005 \sim 0.0015$.

4.2.4 约束条件的处理

无约束设计可能导致不可接受的结果,如零解或极大的数值解,因此建立约束才能使问题的求解具有实际意义.

1) 系统的极限约束问题

由于本文忽略了水平欠驱动机械臂系统的一切摩擦,并且无重力因素,导致系统极易漂移发散.因此,可通过设置误差上下限及惩罚函数来约束此类情况的发生.

本文采用的罚函数为

$$F_a = f_a \cdot \frac{\sim \cdot time}{real_run_time} \cdot dap \cdot \frac{cur_gen}{total_gens}. \quad (8)$$

其中: $dap = \max(|dap_1|, |dap_2|)$ 是跳变时两臂角度跳变量的最大值; cur_gen 是当前进化代数; f_a 是罚因子,取值大小可根据遗传算法染色体个数选取,染色体个数较少时可以取小一些,避免因罚函数过于苛刻而导致进化陷入局部最优; $total_gens$ 是总的进化代数; $real_run_time$ 和 $time$ 代表实际运行时间和设定运行时间,如果系统在仿真开始不久就超过上下限值,则可认为是不可行解而将其抛弃; \sim 是时间权重,随运行时间变化,可以保证可行的参数组合受时间约束的影响较小.

于是,相应的适应度函数变为

$$f = F_a \cdot W^T \cdot s. \quad (9)$$

2) 系统的稳定约束问题

由于系统是动态响应的,要使系统达到稳定,对于每个待优化参数而言都存在这样的约束.但对于有多个优化参数的系统,要想解析地求得系统稳定性与各参数之间的关系,进而得到各参数的约束则非常困难.为解决这种约束,本文采用了抛弃不可行解法.

5 仿真研究

设定两臂的初始位置 $\theta_{10} = 65^\circ$, $\theta_{20} = 25^\circ$; 期望位置 $\theta_{1d} = 70^\circ$, $\theta_{2d} = 20^\circ$; 初始和停止的角速度均为 0. 遗传算法初始种群的染色体取值范围为 $[0, 5]$, 均匀选择 30 个实数编码的染色体,时变交叉概率权重取 0.01,时变变异概率权重为 0.008. $m_1 = 2m_2 = 1 \text{ kg}$, $l_1 = l_2 = 1 \text{ m}$, $I = \frac{4}{3} \text{ ml}^2$, $e_1 = 1 - \theta_{1d}$, $e_2 = 2$

$$\dot{s}_1 = \dot{e}_1 + c_1 e_1, \dot{s}_2 = \dot{e}_2 + c_2 e_2.$$

遗传优化 50 代后的控制参数为 $\hat{\alpha}_1 = 3.6576$, $\hat{\alpha}_2 = 2.3875$, $c_1 = 1.7280$, $c_2 = 0.4516$, $W = 2.4579$, $K = 8.7893$. 仿真结果如图 2 ~ 图 4 所示.

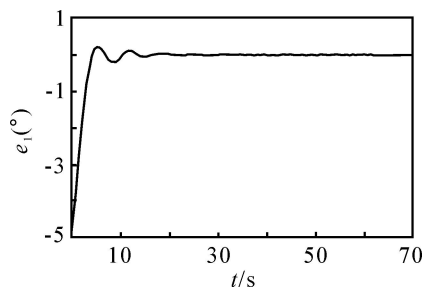


图2 关节1角度误差值

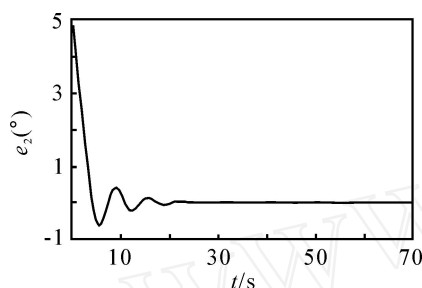


图3 关节2角度误差值

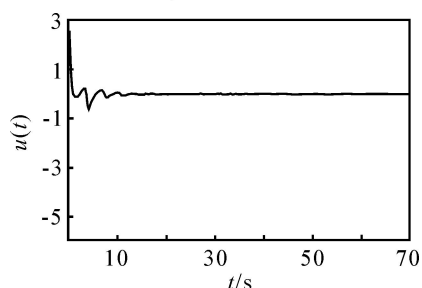


图4 控制器输入 u

通过对仿真曲线和实际数据进行分析后可以看出,经遗传优化后的参数能够使机械臂的两臂基本保持同步调达到目标位置并实现稳态,控制器的输入平滑无抖动.另外,62 s左右的稳定时间相对于文献[5]的基于经验试凑参数的滑模控制和文献[7]的开环谐振控制的稳定时间分别减少 28 s和 45 s,并且系统进入稳态的时间也缩短约 25 s.同时,与文献[5]的控制效果相比,该控制方法几乎不存在稳态误差且抖振大大减少,其控制精度和控制效果明显提高.

6 结 语

本文以水平的二自由度欠驱动机械臂为研究对

象,设计了一套完整的欠驱动系统控制器参数的全参数遗传优化分层滑模控制器.仿真结果显示,该方法基本实现了系统的全局优化及有效控制.通过合理选择遗传操作方式和惩罚系数,经优化设计的系统与采用经验试凑选择参数的系统相比,具有更好的响应性能和抖振抑制效果.实际上,对于不同的欠驱动系统和相应的优化设计目标,可以采用不同的性能指标、控制算法甚至优化策略.因此,该方法对于其他欠驱动系统的优化控制研究,也有很好的参考价值.

参考文献(References)

- [1] Mon Y J, Lin C M. Hierarchical fuzzy sliding-mode control [C]. Proc IEEE World Congress on Computational Intelligence. Honolulu, 2002: 656 - 661.
- [2] Lo J C, Kuo Y H. Decoupled fuzzy sliding-mode control [J]. IEEE Trans on Fuzzy System, 1998, 6(3): 426 - 435.
- [3] Wang W, Yi J, Zhao D, et al. Design of a stable sliding-mode controller for a class of second-order underactuated systems [J]. IEEE Proc of Control Theory and Applications, 2004, 151(6): 683-690.
- [4] Arai H, Tanie K, Arid N Shiroma. Nonholonomic control of a three-dof planar underactuated manipulator [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1998, 14(5): 681-695.
- [5] 林壮. 欠驱动水平机械臂的分层滑模变结构控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006: 31-44.
(Lin Zhuang. Hierarchical variable structure sliding mode control for robots with underactuated joints[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006: 31-44.)
- [6] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
(Zhou Ming, Sun Shu-dong. Genetic algorithm theory and application[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999.)
- [7] 朱齐丹. 具有非驱动关节的机器人控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2002: 35-78.
(Zhu Qi-dan. The study of control for robots with underactuated joint [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2002: 35-78.)