

控制技术

4自由度机械手的滑模变结构轨迹跟踪控制

Sliding mode trajectory tracking controller for the 4-DOF manipulator

叶多芳，葛为民

YE Duo-fang, GE Wei-min

(天津理工大学 机械工程学院, 天津 300384)

摘要：针对机械手的高度非线性、强耦合的特性，依据滑模变结构控制理论，提出了一种机械手的滑模变结构的控制方法，并对其进行仿真。仿真结果证明该方法对4自由度机械手的轨迹跟踪的有效和准确性。

关键词：机械手；滑模变结构；轨迹跟踪；控制

中图分类号：TP29

文献标识码：B

文章编号：1009-0134(2009)05-0006-02

0 引言

由于多关节的机械手是一个强耦合非线性动态系统^[1]，而且其交耦特性还在很大范围内随机械手的位置及运动状况发生变化。因此，用常规的控制手段，很难达到快速高精度的跟踪控制的要求。设计此类控制策略的关键是^[2]：避免复杂的非线性补偿计算；控制系统应对机械手的位置参数的变化及数学模型的不精确具有不灵敏。因此，研究这类系统的控制问题有十分重要的理论价值和实践意义。

滑模变结构控制方法比较适合于机械手的控制^[3]。这主要是因为滑模变结构控制对一类有外界干扰和参数变化具备某种不变性，或称完全鲁棒性，这对于机械手控制非常有利，它可以削弱由于负载变化或随机干扰对系统控制性能的影响。

1 4自由度机械手的动力学模型

根据科研项目的需要，我们自行设计了4自由度机械手，该机械手的结构如图1所示，参数如表1所示。机械手控制系统是采用一个控制卡，同时控制4个电机，几个电机可以相互协同动作，操作系统是通用的Windows2000/XP，开发工具是VC。控制系统具有开放性，用户可以对系统的底层进行操作，开发自己的程序，同时还具有较好的重复定位精度、

动作灵活操作范围广、功率小和易用性等优点。该机械手主要用于教学领域和控制研究。

表1 4自由度机械手系统参数

| 关节 | 质量 Kg | 长度 mm |
|----|----------|----------|
| NO | | |
| 1 | 6.84 | 200.0 |
| 2 | 3.24 | 595.5 |
| 3 | 1.54 | 341.9 |
| 4 | 1.74 | 185.6 |

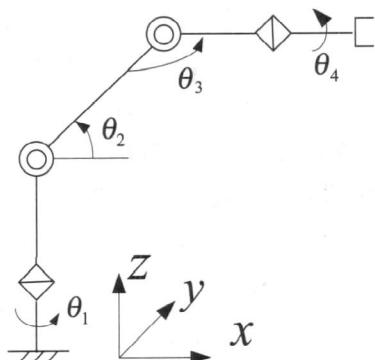


图1 4自由度机械手结构图

对于4自由度机械手，可用拉格朗日(Lagrange)方程：

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = \tau_i \quad (1)$$

收稿日期：2008-11-17

基金项目：天津市自然科学基金(06YFJMJC03600)；天津市高等学校科技发展基金(2006BA11)

作者简介：叶多芳(1982-)，男，河南周口市人，硕士研究生，研究方向为机器人技术。

式中 $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T$, $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3 \ \dot{\theta}_4]^T$, $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ \tau_4]^T$, $L = K(\theta, \dot{\theta}) - P(\theta)$ (2), 式中 $K(\theta, \dot{\theta})$ 及 $P(\theta)$ 分别表示机械手的动能和势能。且 $K(\theta, \dot{\theta}) = 0.5\theta^T M(\theta)\theta$ (3), 式中惯量矩阵 $M(\theta)$ 对所有 θ 是对称正定矩阵。将式 (2) 及式 (3) 代入式 (1) 中, 机械手的动态方程为

$$M(\theta)\ddot{\theta} + [\sum_{i=1}^4 \theta_i \frac{\partial}{\partial \theta_i} M(\theta)]\theta - 0.5 \frac{\partial}{\partial \theta} \theta^T M(\theta)\theta + \frac{\partial}{\partial \theta} P(\theta) = \tau \quad (4)$$

式中左边第二及第三项分别代表复合向心力和离心力; 最后一项表示重力。方程 (4) 可以简写成

$$M(\theta) \frac{d^2}{dt^2} \theta + U(\theta)\lambda + g(\theta) = \tau$$

式中

$$\begin{aligned} \lambda &= [\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4, \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4, \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4, \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_4]^T \\ g &= [\partial P / \partial \theta_1, \partial P / \partial \theta_2, \partial P / \partial \theta_3, \partial P / \partial \theta_4]^T \\ U &= \{r_{ij}(\theta)\}, U \in R^{4 \times 10} \end{aligned}$$

结合机械手结构和参数, 运用拉格朗日方法^[4]可以求出动态方程中各个矩阵如下

$$M = \begin{pmatrix} 0.44 + 0.192c_2^2 + 0.38c_{23}^2 + c_2c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4.46 + 1.24c_3 & 2.44 + 0.62c_3 & 0.016 \\ 0 & 2.44 + 0.62c_3 & 2.44 & 0.016 \\ 0 & 0.016 & 0.016 & 0.02 \end{pmatrix}$$

$$U = \begin{pmatrix} 0 & u_{12} & u_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ u_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & u_{26} & 0 & u_{28} & 0 & 0 \\ u_{31} & 0 & 0 & 0 & u_{35} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$g = \begin{pmatrix} 0 \\ 2.92gc_2 + 0.93gc_{23} \\ 1.03gc_{23} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} u_{12} &= -(3.84s_2c_2 + 0.76s_{23}c_{23} + s_{23}c_2) \\ u_{13} &= -(0.76s_{23}c_{23} + s_{23}c_2) \\ u_{21} &= 1.92s_2c_2 + 0.38s_{23}c_{23} + 0.5s_{23}c_2 + 0.5s_2c_{23} \\ u_{26} &= -1.24s_3 \\ u_{28} &= -0.62s_3 \\ u_{31} &= -0.5m_{13} \\ u_{35} &= 0.62s_3 \end{aligned}$$

2 滑模变结构控制器设计

令 θ_d 为所求的状态矢量, 偏差矢量为 $e = \theta - \theta_d$, 则 $\frac{d}{dt} e = \frac{d}{dt} \theta - \frac{d}{dt} \theta_d$, $\frac{d^2}{dt^2} e = \frac{d^2}{dt^2} \theta - \frac{d^2}{dt^2} \theta_d$

再令控制输入量为

$$\tau = g(\theta) + M(\theta) \left\{ \frac{d^2}{dt^2} \theta_d - C \frac{d}{dt} e + \mu \lambda \right\} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)中, 得

$$\frac{d^2}{dt^2} e + C \frac{d}{dt} e = \{\mu - U'(\theta)\} \lambda ,$$

式中 $U'(\theta) = \{u'_{ij}(\theta) = M^{-1}(\theta)U(\theta)\}, U'(\theta) \in R^{4 \times 10}$, $\mu = \{\gamma_j\}$ ($i=1, \dots, 4; j=1, \dots, 10$)

矩阵 $U'(\theta)$ 仅与状态量有关, 其元 $u'_{ij}(\theta)$ 的上下限值可以事先估算出来, 即已知: $u'_{ij \max} \geq u'_{ij}(\theta) \geq u'_{ij \min}$ 。现在选用线性切换函数: $s = \frac{d}{dt} e + Ce$, 当滑模可达性及存在性成立时, 系统进入滑模运动, 此时就有 $\frac{d}{dt} e = -Ce$, 只要取 $c > 0$ 就可以实现渐近稳定跟踪。

采用广义滑模条件 $s_i \frac{d}{dt} s_i < 0$, 结合式(1), 可以得到下面的不等式:

$$\sum_{j=1}^{10} (\gamma_{ij} - u'_{ij}) \lambda_j s_i < 0 \quad i = 1, \dots, 4 ,$$

于是得滑模变结构控制法则为

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} \gamma_{ij}^+ > u'_{ij \max}, \lambda_j s_i < 0 \\ \gamma_{ij}^- < u'_{ij \min}, \lambda_j s_i > 0 \end{cases}$$

4 自由度机械手滑模变结构轨迹跟踪控制系统结构如图 2 所示:

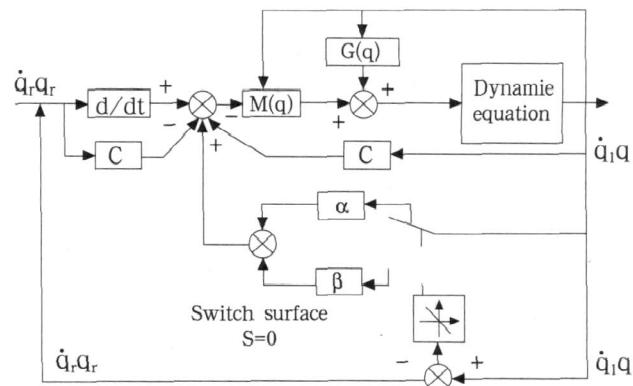


图 2 滑模变结构轨迹跟踪控制系统结构图

3 仿真研究

假设跟踪轨迹为 $\theta_1 = \sin(t)$, $\theta_2 = \cos(t)$, $\theta_3 = t \sin(t)$, $\theta_4 = \sin(t)$ 。系统初始值为 $\theta_1(0) = 1$, $\theta_2(0) = 0.9$, $\theta_3(0) = 0.4$,

$q_4(0)=0.6$ 。滑模控制参数C=diah[20,20,20,20]。仿真结果如图3~图6所示。

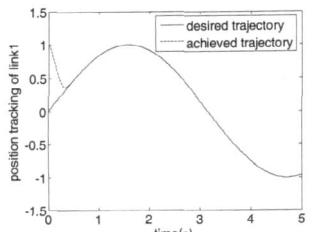


图3 关节1的位置跟踪

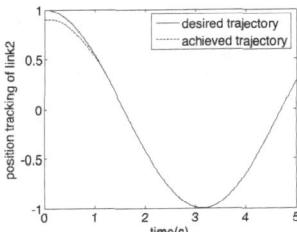


图4 关节2的位置跟踪

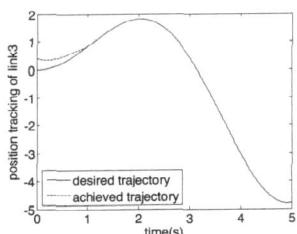


图5 关节3的位置跟踪

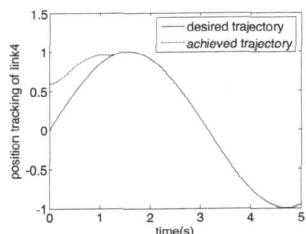


图6 关节4的位置跟踪

从仿真结果可以看出，本文所设计的滑模变结构轨迹跟踪控制器能够在很短的时间内实现跟踪目标轨迹。该方法具有一定的使用价值。

4 结论

本文采用滑模变结构控制的方法对机械手进行了轨迹跟踪的控制并通过仿真实验证明此种方法对机械手的轨迹跟踪是一种行之有效的方法。

参考文献：

- [1] 王庭树.机器人运动学及动力学[M].西安:西安电子科技大学出版社,1990.
- [2] 王丰尧.滑模变结构控制[M].北京:机械工业出版社,1995.
- [3] 孙迪生,王炎.机器人控制技术[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [4] 徐缤昌,等.机器人控制工程[M].西安:西北工业大学出版社,1989.

【上接第3页】

信息技术手段，提高管理效率，减少决策失误。主要包括：销售、财务、办公等系统，人力资源管理系统和决策系统等。这些系统很多企业已经基本应用，但如何和与其他系统有机结合，形成联动，需要进一步加深融合深度。

第六，与社会信息化水平相匹配的融合。国家或某一地区的社会信息化水平也直接影响了信息化与工业化的具体融合。基本的信息资源（如通信资源），电子商务应用推广情况，电子安全法规等直接影响了企业相关的信息技术应用的具体实施。可以说社会信息化水平是企业信息化的外部大环境，外部信息化应用程度的高低，直接影响了信息化与工业化的直接融合。沿海区域信息化水平和内地区域的信息化水平差异，也在一定程度上造成沿海企业和内地企业信息化水平的差异，进而造成内地企业效率不高，活力不够。

总体来说，信息化与工业化的融合的内涵一方面以企业的工业产品生产过程中的信息技术利用的基本融合为主导，一方面也依赖整个社会区域信息化水平。这反映了信息化与工业化融合的内在融合和外在融合。理解信息化与工业化融合的具体内涵，有助于具体制定和实施信息化与工业化融合的措施和方法。

4 总结

本文首先介绍了工业化和信息化基本概念，分析了信息化与工业化之间的关系，研究了工业产生的基本过程，进而讨论了信息化与工业化融合的具体内涵：一方面以企业的工业产品生产过程中的信息技术利用的基本融合为主导，一方面也依赖整个社会区域信息化水平。

当然，理解信息化与工业化融合的具体内涵还远远不够，需要充分结合区域企业现状，才能提出有效的信息化与工业化实施具体措施，这也是我们下一步要做的工作。

参考文献：

- [1] 周宏仁.信息化论[M].北京:人民出版社,2008 .
- [2] 中国发展和改革委员会高技术产业司.中国高科技产业化进展报告(2005-2006)[R].北京:北京化学工业出版社,2007.
- [3] 陈小红.工业化与信息化的互动关系及控制[J].统计与决策,2007,(19):151-154.
- [4] 邹生.信息化探索20年[M].北京:人民出版社,2008 .
- [5] 周振华.信息化与产业融合[M].上海:上海三联书店,上海人民出版社,2003.
- [6] Heshmat,Almas,Wanshan Yang.Contribution of ICT to the Chinese Economic Growth[Z].Working Paper ,The RATIO , Institute and Techno-Economics and Policy Program,College of Engineering.Seoul National University,Feb.2006 .