

机器人控制算法的理论与实验研究*

陈辉堂 蒋平

(同济大学电气工程系·上海, 200092)

朱文宏

王月娟 陈启军

(上海交通大学自动控制系, 200030) (同济大学电气工程系·上海, 200092)

摘要: 本文总结了我们的多年来从事机器人控制算法的理论与实验研究成果. 这些控制算法主要包括了滑动模控制、速度信号观测、非线性滑动面、鲁棒控制器、工作空间控制等, 它们都已在我们的研究开发的 JJR-1 型机器人和 DDArm 直接驱动机器人上得到验证. 我们还分别在 JJR-1 型机器人和 DDArm 上开发了可编程数字控制器, 为使用者提供了研究控制算法的环境, 通过实验也进一步证明我们所研究的控制算法的有效性和可行性.

关键词: 机器人控制; 控制算法; 滑动模

1 引言

机器人控制吸引了国际上众多控制学者的关注^[1], 也已取得了丰富的理论成果, 但由于许多实际原因, 能付诸实用的还很少, 本文企图从理论与实践相结合的角度, 介绍我们的理论与实验工作结果. 全文内容包括: 第一节引言, 第二节研究机器人控制算法的实验环境的建立, 第三节控制算法研究, 第四节实验结果与分析, 第五节结论. 由于篇幅限制, 本文只能是一个概要介绍, 至于更详细的内容和实验结果, 可参阅我们已发表的论文.

2 研究机器人控制算法的实验环境的建立

为了试验控制算法, D. G. Bihn 和 T. C. Steve Hsia 曾针对 Puma560 设计了一个机器人控制器^[2], 使研究者可以深入到机器人关节伺服级, 这一控制器用一台 Intel310 (80286 CPU) 完成, 支持 Xenix 软件, 对关节电机施行集中控制. 可以看出, 为了进行控制算法的研究, 须付出很大的代价. 考虑到现今国内情况, 我们研制了一个机器人两级计算机结构的控制器 (IBMPC+8098) 配置在我们研究开发的 JJR-1 机器人^[3,4]和 DDArm^[5]上, 它为用户提供了良好的实验环境, 既可集中控制, 又可进行分散控制, 通用性较强, 这一控制器的完成为我们的实验提供了基础.

我们所研制的数字控制器是一个两级计算机控制系统如图 1, 其中上位机为 IBM-PC (XT/AT) 完成运动规划和下位机管理等高层软件工作, 并可在集中控制时参与关节伺服控制; 下位机以 Intel8098 为核心, 直接与 PWM 功放联接, 进行伺

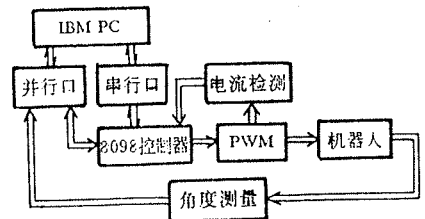


图 1 机器人两级计算机控制系统结构图

* 国家教委博士点基金资助项目.

本文于1990年12月26日收到. 1992年1月19日收到修改稿.

服控制. 这一数字控制器具有很好的人-机界面, 控制律的修改、调试, 通过 IBM-PC 进行. 两级计算机结构的主要优点在于它分散了控制律的运算, 因此使得一些较复杂的控制律可能得以实施, 这一控制器在直接驱动机器人上使用, 结果表明工作性能良好. 该系统采样频率为 500Hz, 具有 17 位的角位移检测精度.

对 JJR-1 教学机器人, 我们同样为其设计了一个 Intel8098 为核心的数字控制器^[6], 并在其中固化了我们调试成功的几种控制算法: 1) PID 控制; 2) 滞后-超前控制; 3) 滑动模控制. 控制参数可任意改变. 这一数字控制器可以对大臂、小臂及腰进行控制, 并且与原系统配接方便, 用户通过 IBM-PC 经 RS-232 串行口管理数字控制器(修改、调试), 数字控制器一经启动后, 它根据指令脉冲量、误差量对机械手三关节进行实时控制. 其采样频率为 400Hz, 具有 12 位的角位移检测精度.

3 控制算法研究

我们研究并实现的几种控制算法的特点和结果如下.

3.1 引入变结构控制

变结构控制的引入主要基于两点考虑: 鲁棒性好、运算量小. 但它的控制量形式是一个大幅值的开关函数, 因此只能在理想情况下保证良好的控制性能, 它是以如下滑动面的绝对吸引条件满足为前提的.

$$s^T \dot{s} \leq -\gamma(\|s\|), \quad \forall s \neq 0.$$

当滑动模态发生后, 原系统等效于一个降阶子系统 $s=0$. 但正是这一绝对吸引条件在实际应用中导致大功耗、高频震颤等现象, 这在高精度机器人控制中是不允许的, 因此引入边界层成为变结构控制在应用时必须采取的措施. 为了在变结构控制器设计时直接对边界层加以考虑, 我们引入滑动域吸引性概念, 用以设计实际稳定的变结构控制器^[7].

减小变结构控制的开关幅值也是改善其实际控制性能的重要手段, 通常可以通过加入一项对不确定部分的等效控制来达到这一目的, 即具有我们所采用的补偿+变结构控制形式. 自适应补偿是一个更加理想的补偿方法, 我们应用超稳定性理论的线性、非线性分割方法, 设计这种自适应补偿+变结构型控制器, 得到如下准则^[8], 令

$$\int_0^t s^T s dt \leq \gamma_0^2 - \int_0^t s^T K s dt, \quad K > 0,$$

则 $\lim_{t \rightarrow \infty} s = 0$.

机器人变结构控制的滑动面通常取为位置误差与速度误差的线性函数, 但这种取法不是最好的, 事实上我们可以定义滑动面为 $s = \dot{e} + f(e)$, 其中 $e^T f(e) > 0$, 我们采用如下非线性滑动面^[9]

$$s = \dot{e} + \frac{c}{1 + K \|e\|} e, \quad c, K > 0.$$

其中 c 的选择决定了位置跟踪精度, 而 K 的选择用以避免控制器饱和. 这一非线性滑动面在以下控制律实施中被采用.

3.2 观测器的采用

机器人系统是一个复杂的非线性系统, 全状态反馈是对机器人控制的基本要求, 但出于价格、体积等考虑, 当今一部分机器人(Puma 560, Adept one), 只配备有位置测量装置,

因此如何根据现有的输出值获得比较满意的速度估计值是非常重要的。

我们在直接驱动机器人中应用了如下常系数和变结构观测器取得很好效果^[5,10,11]。

状态变量 $x_1 = \theta, x_2 = \dot{\theta}$,

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I_n \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{M}^{-1}[F - \varepsilon(\theta, \hat{x}_2)\hat{x}_2 - \hat{G}(\theta)] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_p \\ K_v \end{bmatrix} (\theta - \hat{\theta}).$$

状态变量 $x_1 = \theta, x_2 = M(\theta)\dot{\theta}$,

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \hat{M}^{-1}(\theta) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ F + \hat{M}\hat{\dot{\theta}} - \varepsilon(\theta, \hat{\theta})\hat{\dot{\theta}} - \hat{G}(\theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_p \\ K_v \end{bmatrix} \text{sgn}(\theta - \hat{\theta}).$$

但是考虑到当速度很高时,在理论上不能保证全局稳定性,为此我们又推导得如下采用非线性滤波的速度观测器^[7]

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}} = \begin{bmatrix} \dot{\hat{\theta}} \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I_n \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta} \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1(z) \\ \hat{M}^{-1}(F - \hat{G}) + u_2(z) \end{bmatrix}, \\ z = \theta + v, \quad \hat{e} = z - \hat{\theta} = e + v. \end{cases}$$

其中 $u_1 = \Gamma\hat{e} + a\hat{e}, u_2 = a\Gamma\hat{e} - a\hat{e}$.

3.3 基于观测值的鲁棒控制器

依据以上观测器,我们可以得到基于观测值的鲁棒控制器.其一为^[7]

$$F = \hat{M}\hat{\ddot{\theta}}_d + \hat{G} + a_e(\|e_0\| \|\dot{\theta}_d + \Gamma e_0\|)s,$$

其二为变结构控制形式^[11]

$$F = \hat{M}\hat{\ddot{\theta}}_d + \hat{C} + \hat{G} + K_v s + K_f \int s dt + K_s \text{sgn}[s].$$

其中 $e_0 = \theta_d - z, s = \dot{\theta}_d - \dot{\hat{\theta}} + \Gamma(\theta_d - \hat{\theta}), \Gamma(\cdot)$ 为 3.1 中的非线性滑动面.以上采用观测器的鲁棒控制器的实验结果见[5,7].

3.4 JJR-1 型教学机器人中的几个固化控制律

JJR-1 型教学机器人数字控制器配备有三种控制算法,它们是 PID 控制、滞后-超前控制、滑动模控制^[8],后者的特点是对重力项施行自适应补偿,而对其它快速时变的非线性因素及干扰施行变结构控制,控制算法如下.

设重力项 G 可分解为 $G = G_1 a$, 其中 G_1 为由机械手实际位置决定的函数,通常它的形式比较简单,而 a 为由质量等决定的未知常数,若令

$$F = \sum_i \|P_i\|_{\max} \frac{s}{\|s\|} + G_1 \hat{a} + K_s (\text{控制律}),$$

$$\hat{a} = \int_{t_0}^t K(t-z)G_1^T s dz (\text{自适应辨识律}).$$

其中 $K(t-z)$ 为正定核矩阵, K 为正定矩阵, $\|P_i\|_{\max}$ 为除重力外其余各项的极大范数.

以上算法用户可以根据菜单提示选择任一控制算法,并可进行控制参数修改.

3.5 工作空间控制

机械手关节空间控制是以机械手初始调整时的精确定位为前提的,这使得机器人工

作前的调试准备工作显得异常繁琐,工作空间控制正是考虑到运动学误差,以提高机械手的灵活特性和工作性能为目的.在 JJR-1 型教学机器人上,我们建立了视觉伺服环,将机械手的运动学特性包含于环内,以便增强机械手的灵活性和准确性,在机械手定位不精确的情况下抓取物体.这是一个关节给定值的调整方案如图 2,它根据实际工作情况实时校正关节期望值.我们利用自己研制的一个实时图像处理板^[12,13],实现了实时控制,它能够在 20ms 的采样时间内确定出物体与手爪的位置偏差,通过运动规划器引导手爪趋向于物体.其中的一种方案如下

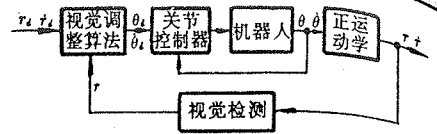


图 2 机器人视觉闭环控制系统

$$\dot{\theta}_d = J^{-1}(\dot{r}_d + K_p e + K_I \int_0^t e dt)$$

引入机器人视觉伺服反馈的一个重要原因,是为了解决定位不准确时的机器人控制问题,考虑 J 中具有不确定因素,以下式代替上式结论依然正确^[14,15].

令

$$\|\Delta\|_m = \|\Delta J J^{-1}\|_{\max} < 1,$$

$$\dot{\theta}_d = \hat{J}^{-1} \left(\dot{r}_d + K_p e + K_I \int_0^t e dt + \frac{\|\Delta\|_m}{1 - \|\Delta\|_m} \|\dot{r}_d + K_p e + K_I \int_0^t e dt\| \frac{e}{\|e\|} \right)$$

4 实验结果与分析

在 JJR-1 型机器人上采用滑动模控制算法,首先进行突加负载试验(负载为 2kg),实验结果见图 3(a),为了便于比较在图 3(b)上还画出 PID 控制在参数整定得最好时的结果.从图上可以看出滑模控制有比较好的性能,经过 3 秒钟达到稳态,最大偏差是 1.25°,而当采用 PID 控制时,到 4 秒钟时还有很大的误差,最大偏差是 1.75°.在做斜坡函数跟踪时,当输入斜坡是 73°/s,并且两臂的位移都是 44°时.跟踪误差曲线表示在图 4 上,滑模控制经过 1.5 秒达到稳态,而 PID 控制在经过 4 秒钟以后还有 1°误差,滑模控制下最大偏差是 3.25°,而 PID 控制是 5.75°,前者性能明显优于后者,二种情况误差都较大,原因是速度跳变比较大的缘故(从零跳变到 73°/s).

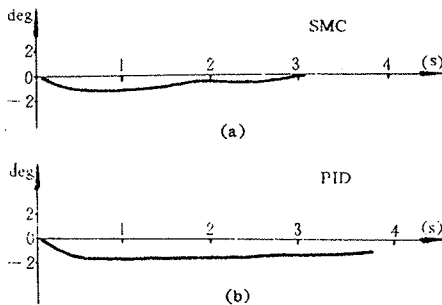


图 3 机器人突加负载时的误差曲线
(a) 滑模控制 (b) PID 控制

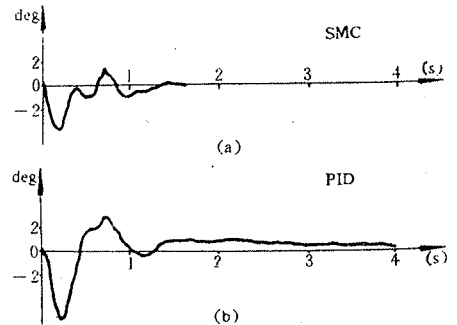


图 4 机器人跟踪斜坡函数时的误差曲线
(a) 滑模控制 (b) PID 控制

在二关节平面型直接驱动机器人上我们采用速度观测器、鲁棒控制器和非线性滑动面,做了连续轨线跟踪精度试验,我们让机器人末端跟踪三种具有典型意义的轨线,第一条是直径为 0.5 米的圆;第二条是长度为 1 米的直线;第三条是两个直径为 0.5 米的半圆和两条长度为 0.5 米的直线所构成的对称封闭曲线,显然在衔接处存在很大期望加速度突跳,跟踪圆和封闭曲线时最大期望切线加速度选为 1 米/秒²,恒速段期望速度选为 0.5 米/秒;跟踪直线时最大期望加速度选为 2.5 米/秒²,恒速段期望速度选为 1 米/秒.所有实验结果均显示了最大关节误差小于 0.05°,关节重复误差小于 0.03°,折算到机器人末端的最大轨线跟踪误差约为 0.5 毫米,轨线重复误差小于 0.3 毫米.图 5 给出了当机器人末端跟踪圆时的误差曲线,由于篇幅限制本文未能给出所有实验结果.通过实验可以证明我们提出的控制算法是正确有效的,而且计算量适中,采用文中介绍的二级计算机系统完全能够实现所有这些算法.

5 结 论

本文按照理论与实践相结合的观点进行了机器人控制算法的理论研究,并且通过实验所提算法进行了验证,实验结果表明这些控制算法是有效的并且是实际可行的.

参 考 文 献

- [1] 蒋新松. 机器人及机器人学中的控制问题. 机器人, 1990, 12(5): 1-13
- [2] Bihn, D. G. and Hsia, T. C. Steve. Universal Six-Joint Robot Controller. IEEE Control Systems Magazine, Special Issue on Robotics and Automation, 1988, 18(1): 31-36
- [3] 陈辉堂等. JTR-1 型教学机器人. 机器人, 1989, 3(5): 1-6
- [4] Chen Hui-tang, et al. An Economical and Powerful Educational Robotic Manipulator. Proceedings of Int. Conf. on Computer Aided Technology, HongKong, 1988, 144-151
- [5] 朱文宏. 直接驱动机器人的高精度 CP 控制. 西安交大博士论文, 1991
- [6] 陈启军, 王月娟, 蒋平, 陈辉堂. 机器人通用数字控制器. 机器人, 1991, 13(7): 38-42
- [7] 蒋平, 陈辉堂, 王月娟. 机械手输出反馈控制的新方法. 第十一届全国控制理论及其应用年会论文集, 杭州, 1990, 229-232
- [8] Chen Huitang and Jiang Ping. An Effective Control Algorithm for Robot Manipulator. Proceedings of Int. Conf. on Automation, Robotics and Computer Vision. Singapore, Mc Grow Hill. 1990, 417-421
- [9] 朱文宏, 陈辉堂, 蒋平. 变滑动面的滑动模控制及其在机器人控制中的应用. 长沙: 中国自动化学会机器人专业委员会 88 年学术年会论文集, 1988
- [10] Zhu, W. H. and Chen, H. T.. A Global Asymptotic Stable Variable Structure Control Algorithm Using Sliding Mode Observer. Proceedings of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Cincinnati, 1990, 130-135

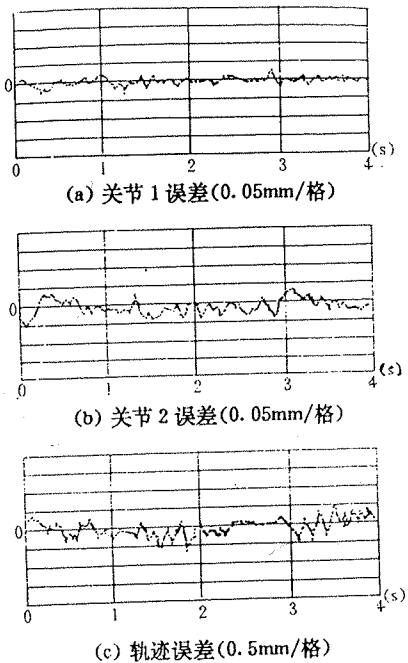


图 5 Scara 型直接驱动机器人末端跟踪圆时的误差曲线

- [11] Zhu, W. H. and Chen, H. T.. Robust Variable Structure Control for Rigid Mechanism. Proceedings of Int. Conf. on Automation, Robotics and Computer Vision. Singapore; Mc Graw Hill, 1990, 457—461
- [12] Cao, B. L., Wang, X. and Chen H. T.. A Real-Time Servo Control Scheme for Robot Manipulator. Proceedings of Int. Conf. on Automation, Robotics and Computer Vision. Singapore; Mc Graw Hill, 1990, 936—939
- [13] 曹柏林. 机器人实时视觉伺服控制系统的研究. 西安交通大学博士论文, 1991
- [14] 蒋平, 王月娟, 陈辉堂. 工作空间坐标下操作器的运动规划与控制. 机器人, 1991, 13(1): 17—26
- [15] Jiang, P., Wang Y. J. and Chen, H. T.. Manipulator Motion Planning and Control in Task Oriented Coordinates Space. Proceedings of Int. Conf. on Automation, Robotics and Computer Vision, Singapore; Mc Graw Hill, 1990, 842—845

Theoretical & Experimental Research of Robot Control Algorithm

CHEN Huitang and JIANG Ping

(Department of Electrical Engineering, Tongji University • Shanghai, 200092, PRC)

ZHU Wenhong

(Department of Automatic Control, Shanghai Jiaotong University • Shanghai, 200030, PRC)

WANG Yuejuan and CHEN Qijun

(Department of Electrical Engineering, Tongji University • Shanghai, 200092, PRC)

Abstract: This paper summarizes our theoretical & experimental research results about robot control algorithms. These algorithms include sliding mode control, velocity observer, nonlinear sliding surface, robust controller, and control in the task space etc. They have been realized on JJR-1 robot & DD arm developed by us. We implemented JJR-1 & DD arm with programmable digital controller, which provides the tool for user to develop his own algorithm. Experiments demonstrate the merits & feasibility of our control algorithms.

Key words: robot control; control algorithm; sliding mode

本文作者简介

陈辉堂 1933年生. 分别于1953年和1956年由上海交通大学本科和研究生毕业, 后留校任教. 曾在苏联杜布纳联合核子研究所工作两年多, 在日本庆应大学作访问教授一年. 现任同济大学信息与控制研究所副所长、教授、博士生导师. 获得国家和省、部级奖励八个. 目前研究领域为智能机器人控制, 计算机控制等.

蒋平 1964年生. 分别于1985年, 1988年和1992年在西安交通大学获学士, 硕士和博士学位, 现在同济大学任教. 目前研究领域为智能机器人控制.

朱文宏 1963年生. 分别于1984年和1987年在西北工业大学获学士和硕士学位. 1991年在西安交通大学获博士学位, 现在上海交通大学博士后流动站工作. 目前研究领域为智能机器人控制.

王月娟 女. 1935年生. 1958年西安交通大学毕业. 现任同济大学副教授. 目前研究领域为智能机器人控制, 估计理论, 大时延系统等.

陈启军 1966年生. 1987年在华中理工大学获学士学位. 1990年在西安交通大学获硕士学位. 现任同济大学助教. 目前研究领域为智能机器人控制.