一种具有非线性观测器的分散式自适应鲁棒机器人控制新方案

郭 巧

(中国科学院系统科学研究所·北京,100080)

摘要:本文提出一种新型的分散式自适应鲁棒机器人控制方案.它主要解决以下诸方面的问题:1) 减少在线计算量;2) 通过设置一个非线性观测器来及时修正模型信息,以适应负载及其他因素变化的需要,进而有效地减少所需控制值(尤其当系统处于平稳工作状态时,效果更加明显),相应地,也就减少了系统工作时的动能损耗.这一点对[1]中提出的机器人分散式变结构控制算法有较大改进;3) 对系统的不确定性和扰动作用具有鲁棒性.

关键词:分散控制;自适应控制;鲁棒控制;机器人控制

1 引 言

由于机器人工作过程中变量之间存在明显的非线性和强耦合作用,给在线快速执行控制算法带来困难.在要求高速高精度运动的情形下,为减少在线计算量,有必要采用分散式控制方式.当系统工作条件(例如:负载环境、齿轮间隙等)及运行轨迹不能预先设定或在柔性加工系统中,人们希望控制规律不直接依赖这些因素.因此,有必要采用具有自适应能力的控制方案.许多已发表的机器人控制方法是以各种非线性补偿方式为基础,来排除彼此相互作用的关节之间影响的.它们的主要缺点是:控制器的设计需要精确的模型信息和负载预报,因而导致了最终控制算法的复杂性.另一种方法是在机构设计过程中,减弱或消除非线性及耦合的影响.这种方法非常复杂,而且只能处理问题的某些方面[1].

60年代,苏联学者提出了一种变结构控制系统(VSCS)理论,用这种方法设计的变结构控制器在某些方面显示出明显的优越性.例如,当系统工作在滑动段时,整个系统对其参数的变化和扰动的作用具有很好的鲁棒性.因此,不必要求精确的对象模型和负载预报,即可把机构之间的非线性耦合关系作为扰动排除掉.如果扰动能被量测,滑动模型对耦合偏差也是鲁棒的[2].一个变结构系统根据系统状态改变它的结构.系统的响应将由开关表面的梯度唯一确定.这样一来,使变结构控制系统具有另一个重要特性:它通常可以实现快速响应、低超调和高精度[3].显然,如果使用线性固定增益控制器很难达到上述控制目的.然而,VSCS也有它的缺点,最主要的是需要大的控制值(特别是当系统存在较大的不确定性时)和大的控制变化率(目前,这个问题已经在某种程度上得到缓解[4]).

本文提出一种新型的具有非线性观测器的分散式自适应鲁棒控制方案.它主要解决以下诸方面的问题:1) 减少在线计算量; 2)通过设置一个非线性观测器来及时修正模型信息,以适应负载及其他因素变化的需要,进而有效地减少了所需控制值(尤其在系统处

本文于1990年12月26日收到.1991年6月6日收到修改稿.

于平稳工作状态时,效果更加明显),相应地,也就减少了系统工作时的动能损耗.这一点对[1]提出的机器人分散式变结构控制算法有较大改进;3)对系统的不确定性和扰动作用具有鲁棒性.

2 控制问题的描述

刚性机器人的动力学方程可以描述为

$$\tau(t) = M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta,\dot{\theta}) + G(\theta). \tag{1}$$

其中 $\tau(t)\in R^n$ 是关节力矩向量;$M(\theta)\in R^{n\times n}$是惯量矩阵;$C(\theta,\dot{\theta})\in R^n$ 是哥氏力向量;$G(\theta)\in R^n$ 是重力向量;$\theta(t)\in R^n$ 是关节位移向量.

由(1)式描述的系统表明:关节变量之间具有很强的非线性特性和耦合关系.因此,采用这个模型进行控制器设计很可能产生在线计算量过大和使控制关系复杂的情形,以致于无法用现今已有的适当价格的微处理机实现其在线实时控制.因而,这里我们采用下面的简化模型方程来描述实际系统

$$\tau(t) = A\ddot{\theta}(t) + \bar{d}(t). \tag{2}$$

其中 $A=\mathrm{diag}(a_{11}\ \cdots\ a_{nn})\in R^{n\times n}$是一个对角正定常数阵;$a_{ii}=(m_il_i^2+J_i)>0$ 是一个常数;m_i 是第 i 个关节的质量;l_i 是它的长度;J_i 是它的转动惯量;$\bar{d}(t)\in R^n$ 是一个时变向量.这里,假设 A 是已知的,并存在

$$\ddot{\theta}(t) = \ddot{\theta}_m(t) + \Delta\ddot{\theta}(t). \tag{3}$$

其中 $\ddot{\theta}_m(t)\in R^n$ 是关节加速度信号的量测值向量;$\Delta\ddot{\theta}(t)\in R^n$ 是系统加速度信号量测偏差向量,并存在

$$|\Delta\ddot{\theta}(t)| \leqslant Q(t). \tag{4}$$

这里 $Q(t)\in R^n$ 是一个已知向量,它表达了偏差 $\Delta\ddot{\theta}(t)$的限界.则方程(2)可写为

$$\tau(t) = A\ddot{\theta}_m(t) + d(t). \tag{5}$$

此处
$$d(t) = A\Delta\ddot{\theta}(t) + \bar{d}(t).$$

$d(t)\in R^n$ 包括了所有不可量测的和/或可变的变量,它即包含了由非线性与子系统之间耦合对系统性能产生的影响,也包含了负载变化,各种扰动及系统状态的量测偏差对系统性能产生的影响.

控制模型被描述为

$$\tau(t) = A\ddot{\theta}_c(t) + \hat{d}(t) + d_c(t). \tag{6}$$

这里 $\ddot{\theta}_c(t)\in R^n$ 是控制器设计中所用向量,

$$\ddot{\theta}_c(t) \triangleq \ddot{\theta}_d(t) + K_v\dot{\tilde{\theta}}(t) + K_p\tilde{\theta}(t). \tag{7}$$

$\tilde{\theta}(t)\in R^n$ 是关节位移偏差向量,如果用 $\theta_d(t)$来表示理想的关节位移向量,则 $\tilde{\theta}(t)$可定义为

$$\tilde{\theta}(t) \triangleq \theta_d(t) - \theta(t). \tag{8}$$

$\hat{d}(t)\in R^n$ 是 $d(t)$的观测向量;$d_c(t)\in R^n$ 是对 $\hat{d}(t)$的补偿向量.

现在,控制任务可以叙述为:

1) 设计一个观测器 $\hat{d}(t)$,在线及时地估计 $d(t)$;

2) 设计一个补偿器 $d_c(t)$,使得 $\tilde{d}(t)\to 0$;

3) 设计一个控制器,使 $\tilde{\theta}(t)\to 0,\dot{\tilde{\theta}}(t)\to 0$.

这里 $\tilde{d}(t) \in R^n$ 是观测偏差向量，并定义

$$\tilde{d}(t) \triangleq d(t) - \hat{d}(t), \tag{9}$$

由(5)和(6)式，可得

$$\tilde{d}(t) = A(\ddot{\theta}_c(t) - \ddot{\theta}_m(t)) + d_c(t). \tag{10}$$

3　控制系统设计方案

定理 1　在控制系统设计中，观测系统以及轨迹跟踪系统是稳定的，如果

1° 非线性补偿器由下式确定

$$d_c(t) = - A(\ddot{\theta}_c(t) - \ddot{\theta}_m(t)) - \eta_0 \mathrm{sat}(S_0(t)/\overline{S}_0(t)). \tag{11}$$

其中

$$\dot{S}_0(t) + \lambda_0 S_0(t) = 0, \tag{12}$$

$$\dot{\overline{S}}_0(t) + \lambda_0 \overline{S}_0(t) = \eta_0, \tag{13}$$

$\eta_0 > 0$为给定正常数；$\lambda_0 > 0$为给定时间常数；

$$\mathrm{sat}(x) = \begin{cases} +1, & x \geqslant +1, \\ x, & -1 < x < +1, \\ -1, & x \leqslant -1, \end{cases} \tag{14}$$

$$\ddot{\theta}_c(t) = \ddot{\theta}_d(t) + K_v \dot{\tilde{\theta}}(t) + K_p \tilde{\theta}(t), \tag{15}$$

$k_v \in R^{n\times n}, k_p \in R^{n\times n}$为对角正定阵.

2° 非线性观测器由下式确定

$$\begin{aligned} \hat{d}(t) &= - A\ddot{\theta}_c(t) + \tau(t - \Delta t) + \eta_0 \mathrm{sat}(S_0(t)/\overline{S}_0(t)) \\ &= - (AQ(t) + T(t) + \eta_\theta)\mathrm{sat}(S_\theta(t)/\overline{S}_\theta(t)). \end{aligned} \tag{16}$$

其中 $\tau(t-\Delta t) \in R^n$ 为前一时刻的控制力矩向量；Δt 为采样周期；$T(t) \in R^n$ 为从$(t-\Delta t)$到 t 时间段内控制力矩增量的限界，并有

$$T(t) \geqslant \frac{1}{2} |A(\ddot{\theta}_c(t) - \ddot{\theta}_m(t)) + (AQ(t) + \eta_\theta)\mathrm{sgn}(S_\theta(t))|, \tag{17}$$

$$\mathrm{sgn}(x) = \begin{cases} +1, & x > 0, \\ -1, & x < 0, \end{cases} \tag{18}$$

$$S_\theta(t) = \dot{\tilde{\theta}}(t) + K_v \tilde{\theta}(t) + K_p \int_{t_0}^{t} \tilde{\theta}(t)\mathrm{d}t, \tag{19}$$

$$\dot{\overline{S}}_\theta(t) + \lambda_\theta \overline{S}_\theta(t) = AQ(t) + T(t) + \eta_\theta, \tag{20}$$

$\eta_\theta > 0$为给定正常数；$\lambda_\theta > 0$为给定时间常数.

3° 初始条件

$$S_0(0) = 0, \quad \overline{S}_0(0) \geqslant 0, \tag{21}$$

$$S_\theta(0) = 0, \quad \overline{S}_\theta(0) \geqslant 0, \tag{22}$$

$$\tilde{d}(0) = 0, \quad \tilde{\theta}(0) = \dot{\tilde{\theta}}(0) = \ddot{\tilde{\theta}}(0) = 0. \tag{23}$$

定理 2　整个控制系统是渐近稳定的，如果控制器采用如下形式

$$\tau(t) = A\ddot{\theta}_c(t) + \hat{d}(t) + d_c(t). \tag{24}$$

其中 $\hat{d}(t)$和 $d_c(t)$均由定理 1 确定.

为明确上述定理内容，我们来看下面过程：

设计非线性自适应观测器．令观测系统的开关表面为

$$S_0(t)=\int_{t_0}^{t}\tilde{d}(t)\mathrm{d}t, \tag{25}$$

$$\dot{S}_0(t)=\tilde{d}(t)=A(\ddot{\theta}_c(t)-\ddot{\theta}_m(t))+d_c(t). \tag{26}$$

取系统的 Lyapunov 函数为

$$V_0(t)=\frac{1}{2}S_0^{\mathrm{T}}(t)S_0(t), \tag{27}$$

$$\dot{V}_0(t)=S_0^{\mathrm{T}}(t)(A(\ddot{\theta}_c(t)-\ddot{\theta}_m(t))+d_c(t)). \tag{28}$$

令

$$d_c(t)=-K_{01}(t)-K_{02}(t)\mathrm{sat}(S_0(t)/\bar{S}_0(t)), \tag{29}$$

$$K_{01}(t)=A(\ddot{\theta}_c(t)-\ddot{\theta}_m(t)), \tag{30}$$

$$K_{02}(t)\geqslant\eta_0>0,\quad(\eta_0\text{ 为给定正数}). \tag{31}$$

$\bar{S}_0(t)$将在后面由(49)式给出．则

$$\dot{V}_0(t)\leqslant-\eta_0|S_0(t)|$$

成立．

由(29)～(31)式确定的非线性补偿器 $d_c(t)$可使观测系统渐近稳定，并同时满足滑动条件[4,5]．由(26)和(29)式，知

$$\begin{aligned}\dot{S}_0(t)&=A(\ddot{\theta}_c(t)-\ddot{\theta}_m(t))+d_c(t)\\&=-K_{02}(t)\mathrm{sat}(S_0(t)/\bar{S}_0(t)),\end{aligned}$$

$$\dot{S}_0(t)+K_{02}(t)\mathrm{sat}(S_0(t)/\bar{S}_0(t))=0. \tag{32}$$

则有

$$\dot{V}_0(t)\leqslant-S_0^{\mathrm{T}}(t)\eta_0\mathrm{sat}(S_0(t)/\bar{S}_0(t)).$$

令

$$\dot{S}_0(0)=0. \tag{33}$$

如果已知 $\bar{S}_0(t)$，由(32)，(33)式，可以得到 $S_0(t)$．下面来看观测器的设计．令

$$S_\theta(t)=\dot{\tilde{\theta}}(t)+K_v\tilde{\theta}(t)+K_p\int_{t_0}^{t}\tilde{\theta}(t)\mathrm{d}t. \tag{34}$$

其中 $\tilde{\theta}(t)=\theta_d-\theta(t)$；$\tilde{\theta}(t)\in R^n$ 是跟踪偏差向量．

令系统的 Lyapunov 函数为

$$V_\theta(t)=\frac{1}{2}S_\theta^{\mathrm{T}}(t)S_\theta(t),$$

$$\begin{aligned}\dot{V}_\theta(t)&=S_\theta^{\mathrm{T}}(t)A\dot{S}_\theta(t)\\&=S_\theta^{\mathrm{T}}(t)[A(\ddot{\theta}_d(t)+K_v\dot{\tilde{\theta}}(t)+K_p\tilde{\theta}(t))-A\ddot{\theta}_m(t)-A\Delta\ddot{\theta}(t)]\\&=S_\theta^{\mathrm{T}}(t)[A(\ddot{\theta}_c(t)-A\Delta\ddot{\theta}(t)-\tau(t-\Delta t)-\Delta\tau(t)\\&\quad+\hat{d}(t)-K_{02}(t)\mathrm{sat}(S_0(t)/\bar{S}_0(t))].\end{aligned}$$

其中

$$\Delta\tau(t)=\tau(t)-\tau(t-\Delta t). \tag{35}$$

令

$$\hat{d}(t)=-K_{\theta1}(t)-K_{\theta2}(t)\mathrm{sat}(S_\theta(t)/\bar{S}_\theta(t)). \tag{36}$$

其中

$$K_{\theta1}(t)=A(\ddot{\theta}_d(t)+K_v\dot{\tilde{\theta}}(t)+K_p\tilde{\theta}(t)-\tau(t-\Delta t)-K_{02}(t)\mathrm{sat}(S_0(t)/\bar{S}_0(t)),\tag{37}$$

$$K_{\theta2}(t)\geqslant AQ(t)+T(t)+\eta_\theta,\tag{38}$$

$\eta_\theta>0$ 为给定正常数. 由于

$$0\leqslant|\Delta\tau(t)|\leqslant T(t)\leqslant\tau_{\max}-\tau(t-\Delta t).\tag{39}$$

这里 $\tau_{\max}\in R^n$ 是 $\tau(t)$的最大值向量. $\bar{S}_\theta(t)$将在后面给出. 从上可见

$$\dot{V}_\theta(t)\leqslant-\eta_\theta|S_\theta(t)|.$$

下面我们来确定 $T(t)$的限界. 由

$$A\ddot{\theta}_m(t)=\tau(t)-\hat{d}(t)+K_{02}(t)\mathrm{sat}(S_0(t)/\bar{S}_0(t))$$

以及(35),(36)式可知

$$\Delta\tau(t)=\tau(t)-\tau(t-\Delta t)=-A[\ddot{\theta}_c(t)-\ddot{\theta}_m(t)]-K_{02}(t)\mathrm{sat}[S_\theta(t)/\bar{S}_\theta(t)].$$

$\because$ $\Delta\tau(t)\leqslant T(t)$,

$\therefore$ $$T(t)\geqslant-[A(\ddot{\theta}_c(t)-\ddot{\theta}_m(t))+K_{\theta2}(t)\mathrm{sat}(S_\theta/\bar{S}_\theta)].\tag{40}$$

又 $\because$ $\Delta\tau(t)\geqslant-T(t)$,

$\therefore$ $$T(t)\geqslant A(\ddot{\theta}_c(t)-\ddot{\theta}_m(t))+K_{\theta2}(t)\mathrm{sat}(S_\theta(t)/\bar{S}_\theta(t)).\tag{40'}$$

$\because$ $T(t)\geqslant 0$,

则 $$T(t)\geqslant|A(\ddot{\theta}_c(t)-\ddot{\theta}_m(t))+K_{\theta2}(t)\mathrm{sat}(S_\theta(t)/\bar{S}_\theta(t))|.\tag{41}$$

这里 $\ddot{\theta}_m(t)$可以近似获得,即

$$\ddot{\theta}_m(t)=(\dot{\theta}(t)-\dot{\theta}(t-\Delta t))/\Delta t.\tag{42}$$

由(6),(29),(36)～(38)诸式,可综合得到控制规律为

$$\tau^*(t)=\tau(t-\Delta t)-[A(\ddot{\theta}_c(t)-\ddot{\theta}_m(t))+K_{\theta2}(t)\mathrm{sat}(S_\theta(t)/\bar{S}_\theta(t))].\tag{43}$$

初始条件为

$$\tilde{d}(0)=\dot{\tilde{d}}(0)=0,\tag{44}$$

$$\tilde{\theta}(0)=\dot{\tilde{\theta}}(0)=\ddot{\tilde{\theta}}(0)=0.\tag{45}$$

在方程(29)和(36)中,如果 $\bar{S}_0$和 $\bar{S}_\theta$ 是时变的,则可大大减少控制量中的高频成分的影响,提高系统对高频非动力学模型因素的鲁棒性,进而达到改善整个控制系统工作性能的目的[4]. 对时变的 $\bar{S}_0(t)$,为使

$$\dot{V}_0(t)\leqslant(\dot{\bar{S}}_0(t)-\eta_0)|S_0|,$$

要求在(29)式中,$k_{02}(t)$改为

$$K_{\theta2}(t)=(\eta_0-\dot{\bar{S}}_0(t))>0.\tag{46}$$

当 $|S_0(t)|<\bar{S}_0(t)$时,有

$$\dot{S}_0(t)=-K_{02}(t)(S_0(t)/\bar{S}_0(t)).$$

令

$$K_{02}(t)=\lambda_0\bar{S}_0(t),\quad(\lambda_0>0),\tag{47}$$

$\therefore$ $$\dot{S}_0(t)+\lambda_0S_0(t)=0,\tag{48}$$

$$\dot{\overline{S}}_0(t) + \lambda_0\overline{S}_0(t) = \eta_0. \tag{49}$$

根据同样原则,对时变的 $\overline{S}_\theta(t)$,为使

$$\dot{V}_\theta(t) \leqslant (\dot{\overline{S}}_\theta(t) - \eta_\theta)|S_\theta|,$$

要求(36)式中的 $k_{\theta 2}(t)$的表达式变为

$$K_{\theta 2}(t) = AQ(t) + T(t) + \eta_\theta - \dot{\overline{S}}_\theta(t). \tag{50}$$

当 $|S_\theta(t)| < \overline{S}_\theta(t)$时,令

$$K_{\theta 2}(t) = \lambda_\theta\overline{S}_\theta(t), \quad (\lambda_\theta > 0), \tag{51}$$

则

$$A\dot{S}_\theta(t) + \lambda_\theta\overline{S}_\theta(t) = -\Delta\tau(t) - A\Delta\ddot{\theta}(t), \tag{52}$$

$$\dot{\overline{S}}_\theta(t) + \lambda_\theta\overline{S}_\theta(t) = AQ(t) + T(t) + \eta_\theta. \tag{53}$$

由(49)和(53)式,可以确定出所需的时变 $\overline{S}_0(t)$和 $\overline{S}_\theta(t)$. 这里,λ_0 的 λ_θ 的选取要满足系统动态性能的需要和控制带宽的要求.

由于篇幅所限,有关控制系统的结构图和仿真研究结果请参见[6].

4 结 论

本文提出了一种新型的具有非线性观测器的分散式自适应鲁棒控制方案. 由于采用分散控制方式和简化的系统模型,可使控制器设计的在线计算量大为减少. 为了克服负载和/或系统其他参数变化对控制模型产生的影响,本方案采用一个非线性观测器来及时修正相应的模型参数/状态,从而有效地减少了所需控制值,进而有效地减少了系统工作所耗动能. 这一点对文献[1]提出的方案有很大改进. 另一方面,由于在控制器设计过程中,采用修正的变结构控制系统理论,因而使整个控制系统对扰动和各种时变不确定性具有一定的鲁棒性. 仿真结果[6]显示出了本算法的这些特色.

参 考 文 献

[1] Russel, G. Morgan and Umit Ozguner. A Decentralized Variable Structure Control Algorithm for Robotic Manipulators. IEEE J. of Robotics and Automation, 1985, 1(1):

[2] Utkin, V. I.. Variable Structure Systems with Sliding Mode, IEEE Trans. Automat. Contr., 1977, AC-22:212—221

[3] Itkins, U.. Control Systems of Variable Structure. New York: Wiley, 1976

[4] Slotine, J. J. E.. The Robust Control of Robot Manipulators. Int. J. Robotics Research, 1985, 4:49—63

[5] Slotine, J. J. E., Sastry, S. S.. Tracking Control of Nonlinear System Using Sliding Surfaces, with Applications to Robot Manipulator. Int. J. Control, 1983, 38(2):465—492

[6] 郭巧. 机器人分散式自适应鲁棒控制. 北京理工大学博士学位论文,1989

A New Kind of the Decentralized Adaptive Robust Control Scheme with a Non-Linear Observer for Robot Manipulators

GUO Qiao

(Institute of Systems Science, Academia Sinica • Beijing, 100080, PRC)

Abstract: This paper presents a new kind of the decentralized adaptive robust control scheme with a non-linear observer for robot manipulators. It can largely increase the speed of generating the control signals on-line because of using the way of decentralized control and the simplified model of the system to be controlled. In order to overcome the influence on the control model, which is caused by the changes of the payload and/or the other parameters of the system, this scheme makes use of a non-linear observer to revise promtly the parameters/states of the model so as to reduce effectively the kinetic energy cost of the working system. In this sense, this scheme has an great advantage over other similar ones[1]. On the other hand, because the modified variable-structure control system theory is used in the process of controller design, the whole system has the good robustness to the disturbances and the various kinds of time-varying uncertainties. The simulation results have shown these.

Key words: decentralized control; adaptive control; robust control; robot control

本文作者简介

郭 巧 见本刊1992年第3期第282页.