

⑭ 计算力矩—自校正机器人控制算法

83-88

THE ALGORITHM OF COMPUTED TORQUE —SELF TUNING CONTROL FOR ROBOT

杨永臻

Yang Yongzhen

(重庆大学电子信息工程学院)

苗义

Miao Yi

TP242.2

摘要 近年来已经开发出一些应用于复杂非线性系统的自适应控制方案,机器人控制系统就是典型的例子。由于不可避免地存在着非模型化的动特性,将自适应技术和基于模型的非线性控制有机地结合起来,充分利用能够得到的参数模型,通过自适应控制处理剩余的未知参数部分,可能是一种有效的控制策略。本文提出一种适用于机器人的计算力矩—自校正控制算法。仿真结果证实了方案的有效性。

关键词 机器人 / 计算力矩; 自校正 控制系统

中国图书分类法分类号 TP242.2; TP273.2

ABSTRACT Some control schemes for complex nonlinear systems have been developed recently and the robotic adaptive control is one of the typical examples. Due to the inevitable presence of unmodeled dynamics, if the adaptive control technique combined with nonlinear model-based control takes full advantages over any known parametric model while dealing with the remaining unknown parameters by using adaptive control, it may be an efficient control strategy. therefore, an algorithm of computed torque-self tuning control for robot is presented, whose simulation results have proved its effectiveness.

KEY WORDS robots / computed torque; self-tuning

0 前 言

对于一类较复杂的控制系统,当系统模型仅是部分已知或在运行过程中系统的动特性会发生变化时,使用自适应控制技术将是恰当的。自适应控制已经有了可以理解的支柱理论,能够提出设计导则,并可指出算法的缺陷和限制。迄今,大量的文献中已经提出许多形式不同的自适应控制方法,其中的一些方法在解决特定问题时是成功的,但还不能肯定的说能够很好地工作在广泛的领域。近来,附加有直觉推理的自适应控制受到了重视,但其控制策略还需要进一步充实完善。规范的基于数学模型的控制方案,在指定的假设条件下是有效而稳定的,当这些假设条件与实际运行情况不符时,就会出现问題。随着对控制系统的稳定性、

* 收文日期 1991-09-18

鲁棒性、瞬态响应、跟踪特性和实际限制等综合研究的进展,自适应控制正在取得有吸引力的成果,但在诸如非模型化的高频特性、鲁棒估计、先验知识的运用等问题没有得到很好解决以前,从机器人控制的实际需要出发,将自适应和非自适应控制律有机地结合起来,充分利用能够得到的参数模型,通过自适应控制处理剩余的未知参数部分,应该是一种合理的控制策略。

1 自适应控制在机器人中的应用

控制系统在机器人的组成中起着核心作用。机器人是一种高度非线性、强耦合和负载不确定的控制对象,要使它精确而快速地跟踪期望轨迹,必须采用先进、有效的控制算法。但是,已经发表的部分机器人自适应控制方案是建立在较弱的理论基础上的。先前的自适应方案集中于跟踪线性化对象的设定运动轨迹,以减少计算复杂动态模型的计算量,由于所依据的理论仅适用于未知常数参数,稳定性证明也不完善,控制效果不尽如人意。随着计算机技术的发展,将机器人动态模型计算作为控制律的一部分,已不再是过高的要求。因而,与其为了减少计算量而使用自适应控制,还不如将目标放在改善与非自适应系统相对应的性能上。

Dubowsky 等人^[1]提出的模型参考自适应控制方案是以线性解耦模型为基础的,仅当机器人的组态变化慢于自适应律时才有效。Tomizuka 等人^[2]提出了计算机器人部分动特性的方案,仅将操纵器的位置处理为在线辨识的未知参数。Koivo^[3]使用离散线性时不变解耦模型来模型化机器人的动特性,采用自校正控制算法进行自适应。大多数自适应控制方案是在慢时变的假设下使用线性模型,显然与实际运行情况有较大差距。另外一些工作是在机器人自适应控制的名称下进行的,这些基于滑动模式或变结构系统方案,不进行参数辨识。

许多研究者使用自适应控制的目的是为了避开非线性模型计算。随着计算机的计算能力的增强和计算动态模型方案的不断改进,基于模型的“计算力矩”法,重新受到了重视^[4],同时也出现了保留计算力矩法的结构,但附加有自适应单元的控制方案^[5]。典型的系统方框图如图1所示。图中每一关节视为一个独立的具有固定动特性的系统,自适应单元观测伺服误差和调整控制律中的部分参数。

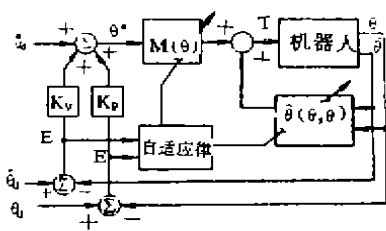


图1 具有自适应单元的机器人控制器

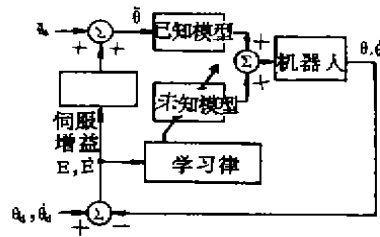


图2 机器人的学习控制方案

在自适应控制范畴内的学习控制方案(图2),可以看作是为了改善重复动作性能的一种控制方法。关节上的摩擦效应是难以模型化的,将由在线参数辨识得到的参数应用于学习控制器的建模部分,可以校正可重复的未建模动特性。不可重复性视为系统中的干扰,干扰抑制的精确程度,取决于控制律中已知和未知模型的分配。充分学习以后,在机器人臂杆转矩和速度限制范围内,可以以低值误差实现任意路线跟踪。

2 “计算力矩—自校正”控制算法

这是一种机器人综合控制算法,特点是充分利用机器人的已知信息,同时采用自适应技术克服系统中不确定因素的影响,以求提高系统的控制性能。系统框图如图3所示。

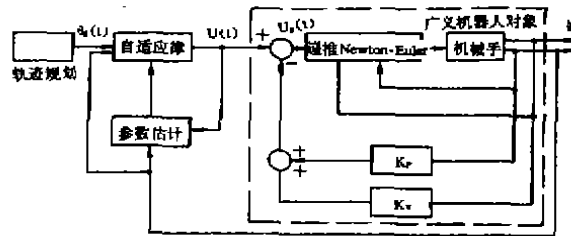


图3 “计算力矩—自校正”机器人控制系统框图

2.1 计算力矩法

驱动关节运动的转矩表达式,即为由向量和矩阵所表达的机器人动态模型,可以写为:

$$T = M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + F(\dot{\theta}) + G(\theta) + T_e \quad (1)$$

其中 $[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$ 是关节位置的 $n \times 1$ 向量;

$\dot{\theta}, \ddot{\theta}$ 是速度和加速度向量;

$M(\theta)$ 是 $n \times n$ 质量矩阵;

$V(\theta, \dot{\theta})$ 是由离心力和哥氏力所产生的转矩向量;

$F(\dot{\theta})$ 是作用在关节上的摩擦力所产生的转矩向量;

$G(\theta)$ 是重力力矩向量;

T_e 是由非模型化动特性和外加干扰所形成的未知信号向量。

计算力矩法以下式为基础求取控制律:

$$T = \hat{M}(\theta)\ddot{\theta} + \hat{V}(\theta, \dot{\theta}) + \hat{F}(\dot{\theta}) + \hat{G}(\theta) \quad (2)$$

或

$$T = \hat{M}(\theta)\ddot{\theta} + \hat{h}(\theta, \dot{\theta}) + \hat{G}(\theta) \quad (2)$$

(2)式中的第 j 个元素可以写为“乘积和”的形式,即

$$T_j = \sum_{i=1}^n m_{ji} f_{ji}(\theta, \dot{\theta}) + \sum_{i=1}^n q_{ji} g_{ji}(\theta, \dot{\theta}) \quad (3)$$

其中 m_{ji} 和 q_{ji} 是连杆质量,连杆惯性张量元素、长度、摩擦系数和重力加速度常数等物理量的乘积; $f_{ji}(\theta, \dot{\theta})$ 和 $g_{ji}(\theta, \dot{\theta})$ 是体现机器人运动几何动态结构的函数。(2) 式中带有符号“ $\hat{}$ ”的值,表示是从真实参数计算出的估值。且有

$$\ddot{\theta}^* = \ddot{\theta}_d + K_v \dot{E} + K_p E \quad (4)$$

其中伺服误差 $E = [e_1, e_2, \dots, e_n]^T$, 并定义为 $E = \theta_d - \theta$; K_p 和 K_v 是在对角线上具有 $K_{p_i} > 0$ 和 $K_{v_i} > 0$ 的 $n \times n$ 常数对角线增益矩阵。

假设机器人自由端的期望轨迹是已知的,并可用关节位置、速度和加速度的时间函数 $\theta_d(t), \dot{\theta}_d(t), \ddot{\theta}_d(t)$ 来表达。控制律(2) 在参数值完全已知和无干扰情况下成立,这时,闭环误差动特性可由下式给出:

$$E + K_v E + K_p E = M^{-1}(\theta) T_d \quad (5)$$

在此理想状况下, K_v 和 K_p 可由配置每一关节的闭环极点来选定, 而且在机器人整个工作空间的干扰抑制是一致的。

设 U_d 是命令加速度向量, 理想情况下

$$\ddot{\theta} = U_d(t) \quad (6)$$

对(6)式所描述的系统进行状态反馈控制, 即

$$U_d(t) = U(t) - K_v \dot{\theta} - K_p \theta \quad (7)$$

其中 $U(t)$ 是参考信号向量, $K_v = [K_{v_i}]$ 和 $K_p = [K_{p_i}]$ 是速度和位置的对角反馈矩阵, 这时

$$U(t) = \ddot{\theta} + K_v \dot{\theta} + K_p \theta \quad (8)$$

则机器人控制系统转变为由(8)式所描述的线性、解耦的二阶微分方程, 正确选择 K_v 和 K_p 可以保证(8)式稳定, 并可实现极点任意配置。如果选择

$$U(t) = \ddot{\theta}_d + K_v \dot{\theta}_d + K_p \theta_d \quad (9)$$

其中 θ_d , $\dot{\theta}_d$ 和 $\ddot{\theta}_d$ 分别为给定的参数向量。这时(7)式的命令加速度向量可改写为:

$$U_d(t) = \ddot{\theta}_d + K_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_p(\theta_d - \theta) \quad (10)$$

按(10)式选择参考信号, 适用于机器人的轨迹跟踪控制。上述简化处理表明: 在理想状况下, 基于模型的机器人控制还是可以良好实现的。但在实际运行环境中, 必将存在误差 $E(t)$, 当 $E(t)$ 造成的跟踪误差超出实际允许范围时, 系统性能恶化。增加反馈增益 K_v 和 K_p 值可以减小 $E(t)$ 的影响, 但将使系统对噪声更加敏感, 甚至导致系统失稳。尽管随着机器人动力学的 Newton-Euler 递推算法的建立, 计算力矩法的计算时间问题, 基本上已经得到了解决, 但单独使用计算力矩法对高速机器人进行控制, 仍难达到预期的性能指标。为此, 在该法的基础上加进自适应技术, 降低算法对模型不准确以及不确定性因素的敏感性, 以求最大限度地提高控制性能。

2.2 自校正控制

在自校正控制的名称下, 已经出现了多种结构不同的算法。从机器人系统的不确定性因素较多, 而且一般不允许有超调, 以及要求采样周期短等特点出发, 选用极点配置自校正控制算法较为恰当。

为了设计极点配置自校正控制器, 首先对由(8)式所描述的过程进行离散化处理, 得到第 i 关节的差分方程:

$$(1 + a_{i1}z^{-1} + a_{i2}z^{-2})\theta_i(k) = z^{-1}(b_{i0} + b_{i1}z^{-1})u_i(k) \quad (11)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 为机器人的关节数;

$\theta_i(k)$ 为关节 i 的位置采样值;

$U_i(k)$ 为关节 i 的参考信号离散值。

如将误差 $E(t)$ 视为外界对过程的干扰信号, 则式(11)可改写为:

$$(1 + a_{i1}z^{-1} + a_{i2}z^{-2})\theta_i(k) = z^{-1}(b_{i0} + b_{i1}z^{-1})U_i(k) + e_i(k) \quad (12)$$

其中 $e_i(k)$ 为 $E_i(t)$ 的离散值。最后得到的一般表达式为:

$$A_i(z^{-1})\theta_i(k) = z^{-d}B_i(z^{-1})U_i(k) + C_i(z^{-1})e_i(k) \quad (13)$$

不失一般性, 省去(13)式中的下脚 i , 并用 $Y(k)$ 代替 $\theta(k)$, 则可写为通用的 ARMAX 模型:

$$A(Z^{-1})Y(k) = z^{-d}B(Z^{-1})U(k) + C(Z^{-1})e(k) \quad (14)$$

极点配置自校正控制器的设计问题是对(14)式寻求指标函数

$$J = E \{ [P(z^{-1})Y(k+d) - R(z^{-1})Y_d(k)]^2 + \frac{g_0}{l_0} [L(z^{-1})F(k)]^2 \} \quad (15)$$

为极小的控制律,并且实现闭环极点配置,其中 $g_0 = B(0)F(0)$, $l_0 = L(0)$ 。解(14),(15)式可得控制律为:

$$F(k) = \frac{c(z^{-1})R(z^{-1})Y_d(k) - G(z^{-1})Y(k)}{C(z^{-1})L(z^{-1}) + B(z^{-1})F(z^{-1})} \quad (16)$$

多项式 $G(z^{-1})$ 和 $F(z^{-1})$ 满足恒等式

$$P(z^{-1})C(z^{-1}) = F(z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-d}G(z^{-1}) \quad (17)$$

$$\deg G = (\deg pc) - d, \deg F = d - 1$$

闭环系统的特征方程为:

$$A(z^{-1})L(z^{-1}) + P(z^{-1})B(z^{-1}) = T(z^{-1}) \quad (18)$$

$T(z^{-1})$ 根据工艺要求选定,为使(18)式有唯一解,阶次关系应为:

$$\deg L = \deg B - 1; \deg P = \deg A - 1; \deg T = \deg A + \deg B - 1.$$

若(18)式成立,控制器的闭环方程为:

$$Y(k) = \frac{z^{-d}B(z^{-1})R(z^{-1})}{T(z^{-1})}Y_d(k) + \frac{c(z^{-1})L(z^{-1}) + B(z^{-1})F(z^{-1})}{T(z^{-1})}e(k) \quad (19)$$

极点配置自适应控制算法方框图如图4所示,

图4即为图3中的自适应律,为了保证稳态无偏,可在线整定 R ,取 $R = T(1)/B(1)$,采用递推最小二乘法对参数向量进行估计。

2.3 数字仿真

“计算力矩—自适应”机器人控制算法,以 PUMA 机器人模型为基础进行了数字仿真(6)。仿真过程中,考虑了建模误差、机器人负载大幅度变化和电机特性影响等不确定性因素。由于采样周期与机器人结构的共振频率和控制算法所需时间有关,取采样周期为10毫秒,仿真曲线如图5所示。

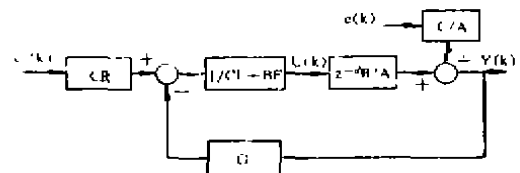


图4 自适应控制算法框图

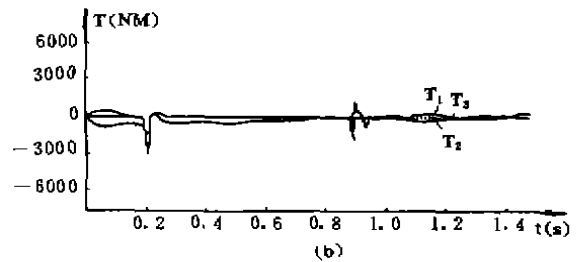
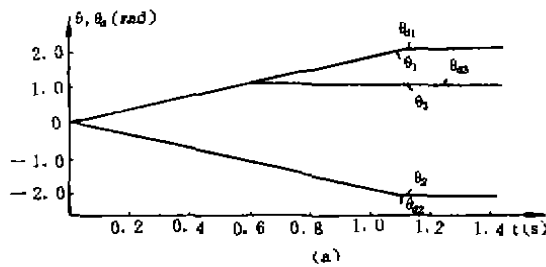


图5 “计算力矩—自适应”机器人控制算法仿真曲线

(a) 位置输出曲线

(b) 驱动力矩曲线

给定信号采用简单但却有代表性的加速度为 Bang-Bang 型的信号,首先由“计算力矩”法起动,经过0.17秒的自学习后,无扰地加入自适应控制,仿真证实本方案有如下特点:

- (1) 起动性能好。起动时离心力和哥氏力的影响不大,这时仅用内环控制,外环自适应

律只辩认不控制,通过短时间地自学习后,再无扰地加入自校正控制,从而改善了自校正方法的起动性能:

(2) 抗干扰能力强。因为综合控制方案是一种串联系统,对不确定性因素不敏感;

(3) 自校正控制部分的运算量不大。由于内环的补偿作用,不仅使相互关联的多变量系统改变为各自独立的单变量系统,而且使自校正控制的过程阶次降低。由于参数辨识不需当前时刻采样值,Diophantine 方程也可先行解出,致使这种串联系统仍适合于采用并行计算。

(4) 综合控制方案的适用范围广。对于工作路径和负载经常发生变化,而且对性能要求很高的机器人,都有应用价值。

3 结束语

机器人是本世纪具有深远意义的一种高、新技术。近年来,其研究及应用均已取得很大进展,但机器人的控制问题仍然是人们关注的重要问题之一。对这样一类复杂控制系统,应该是既重视模型而不唯模型,探索新的控制算法又充分利用确有成效的现有方法,互不排斥,互为补充,辩证地全面体现理论密切联系实际的思想。本文的工作正是从这一观点出发,提出了一种适用于机器人的综合控制算法——“计算力矩—自校正”法,数字仿真结果及特点论述证实了本算法的有效性。作者相信,随着各种计算方法的不断完善,各种控制方案的互相结合与渗透,以及实现手段的提高,必将为复杂控制系统的应用开辟更广阔的前景。

参 考 文 献

- 1 Dubowsky S, Desforges D T. The Application of Model - Referenced Adaptive Control to Robotic Manipulators ASME J. Dynam. syst. Meas. Contr, 1979, 101
- 2 Tomizuka M, Horowitz R. Model--Reference Adaptive control of Mechanical Manipulators. IFAC Adaptive systems in Control and Signal Processing, San Francisco, 1983
- 3 Koivo A J. Force-velocity control with self-tuning for Robtic Manipulators. IEEE Conference on Robotics and Automation, San Francisco, April, 1986
- 4 Burdick J W. An algorithm for generation of efficient manipulator dynamic equations, proceeding of the 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, April, 1986
- 5 Craig J J. Adaptive Control of Mechanical Manipulators, Addison-wesley pulblising company, 1988
- 6 苗义. 工业机器人自适应控制方法仿真研究. 重庆大学硕士学位论文, 1988