

多关节机器人的分散预测控制*

席裕庚 许颂华

(上海交通大学自动控制系, 200030)

摘要: 本文提出一种对多关节机器人进行分散预测控制的方法, 这种方法把分散控制的结构优点与预测控制的性能优点结合起来, 以提高控制的实时性和鲁棒性. 文中研究了这一分散控制的多层结构, 并着重讨论了不同分散信息结构下的关连预测策略, 最后以仿真实例说明了这种分散预测控制方法的有效性.

关键词: 机器人控制; 分散控制; 预测控制; 动态矩阵控制; 信息结构

1 引言

工业机器人是具有高度非线性和强耦合的复杂动力学系统. 为了解决其轨线跟踪问题, 近年来人们已提出了各种动力学控制方法, 如线性反馈控制、非线性补偿、自适应控制、变结构控制等, 这些控制策略有着不同的出发点, 适用于不同的控制环境.

在考虑工业机器人的控制策略时, 除了要求其有快速高精度的控制性能外, 还要求算法有良好的实时性和对参数、负载的变化有良好的鲁棒性. 由于PID这类简易算法在控制的综合性能方面显得不足, 而现有的某些控制算法尽管在理论上十分完美, 但实时计算量过大, 又难以为工业界所接受, 所以, 寻找实时性好的有效控制算法, 已成为当前工业机器人控制的重要研究内容.

机器人的动力学模型, 尽管提供了其动力学行为的全部信息, 但其形式过于复杂. 建立在完整模型基础上的控制算法, 必然具有复杂的形式, 其实时实现会有很大困难. 基于这一认识, 我们认为, 要降低在线计算的复杂性, 必须采用分解和简化的思想, 合理而又有限地利用模型信息. 为此, 本文提出一种分散预测控制方法, 其基本思想是通过分散控制简化在线计算, 而通过其分层实现, 把模型信息分配到不同的层次上, 简化每一层次的模型和控制策略. 在这里, 因分散化而引起的信息不足将采用预测手段加以补充, 由于这种方法结合了分散控制的结构优点和预测控制的性能优点, 它将在简化在线计算的同时, 保持优良的控制性能.

2 机器人的分散预测控制结构

一个具有 n 个转动关节的机器人的动力学方程可由下式给出

$$\sum_{j=1}^n \ddot{D}_{ij}(q) \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n D_{ijk}(q) \dot{q}_j \dot{q}_k + G_i(q) = \tau_i, \quad i = 1, \dots, n. \quad (1)$$

由于各关节可由相应的驱动力矩 τ_i 控制, 整体系统可以自然划分为 n 个子系统. 上式表明, 各子系统之间存在着高度耦合.

为了描述子系统间的耦合程度, 引入速度耦合度

* 国家自然科学基金和八六三高技术基金资助项目.

本文于1990年5月14日收到. 1991年3月6日收到修改稿.

$$v_{\alpha} \triangleq \frac{\text{所有包含速度项绝对值之和}}{\text{所有包含速度 } \dot{q}_i \text{ 项绝对值之和}} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n |D_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k|}{2 \sum_{j=1}^n |D_{ijj} \dot{q}_j \dot{q}_j|}$$

v_{α} 的值从 1 到 ∞ , v_{α} 越大, 表明耦合越强。

现对每一子系统引入 PD 反馈 $\tau_i = \tau'_i - k_{pi} q_i - k_{di} \dot{q}_i$, 则式(1)可改写为

$$\sum_{j=1}^n D_{ij}(q) \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n D_{ijk}(q) \dot{q}_j \dot{q}_k + G_i(q) + k_{pi} q_i + k_{di} \dot{q}_i = \tau'_i \quad (2)$$

这时速度耦合度变为

$$v_{\alpha} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n |D_{ijk}(q) \dot{q}_j \dot{q}_k| + k_{di} |\dot{q}_i|}{2 \sum_{j=1}^n |D_{ijj}(q) \dot{q}_j \dot{q}_j| + k_{di} |\dot{q}_i|}$$

很明显, 加入速度反馈后, 关节间的动态耦合将有所减小, 有利于分散控制的实现。

由于经 PD 反馈后的系统(2)的子系统间仍存在着复杂关连, 进一步将(2)代之以

$$d_{ii} \ddot{q}_i + k_{di} \dot{q}_i + k_{pi} q_i = \tau'_i + f_i \quad (3)$$

其中 $d_{ii} = \text{mean}(D_{ii}(q))$, $f_i = d_{ii} \ddot{q}_i - \sum_{j=1}^n D_{ij} \ddot{q}_j - G_i - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n D_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k$.

为子系统 i 与其它子系统间的关连项。上式表明, 若能对关连项 f_i 作出正确的估计, 则分散控制器的设计只须对二阶线性模型(3)进行。对关连项 f_i 的估计问题将在下节讨论。

在采用不同方法对关连项作了估计 $\hat{f}_i$ 后, 仍可能存在估计误差 $e_i = f_i - \hat{f}_i$, 利用估计值对子系统进行前馈补偿, 令 $\tau_i = \tau'_i - \hat{f}_i$, 可得

$$d_{ii} \ddot{q}_i + k_{di} \dot{q}_i + k_{pi} q_i = \tau_i + e_i \quad (4)$$

由于关连的主要部份已得到补偿, 所剩误差项 e_i 与原关连量 f_i 相比已大为减小, 所以可采用鲁棒和跟踪性能都比较好的预测控制算法, 如广义动态矩阵控制^[1], 对线性系统(4)进行分散控制。

综上所述, 可采用图 1 所示的分散预测控制结构实现多关节机器人的控制。其中 PD 反馈削弱了子系统间的动态耦合, 关连预测则对耦合项作出基本估计并予以补偿, 而残存的关连影响作为估计误差, 可进一步通过预测控制算法的强鲁棒性加以克服, 整体控制问题的复杂性, 通过这种分层分散结构得到了分解和简化。

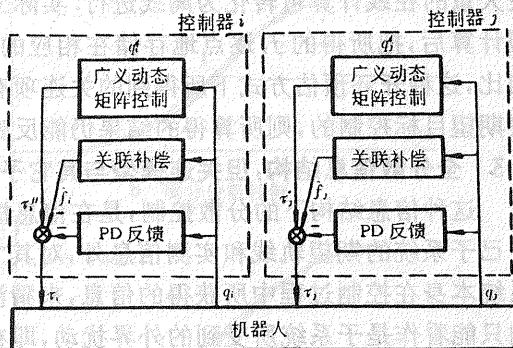


图 1 机器人的分散预测控制结构

3 不同分散信息结构下的关连预估

本节中, 我们主要讨论如何对式(3)中的关连项 f_i 作出在线估计的问题, 这里根据不同分散信息结构下各子系统所能获得的信息, 分别讨论如下

3.1 带有一步时延信息的部分分散信息结构

这种信息结构的特点是: 允许各子系统在线交换信息, 每个子系统都知道它与其它子

系统的关连模型(即 f_i 的形式),并能获得本子系统的即时信息,但其它子系统的实时信息由于传输的滞后,最早要到下一时刻才能利用。

第 i 个子系统的关连项具有形式

$$f_i = d_{i0}\dot{q}_i - \sum_{j=1}^n D_{ij}\ddot{q}_j - G_i - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n D_{ijk}\dot{q}_j\dot{q}_k. \quad (5)$$

在 t 时刻, $f_i(t)$ 不但涉及到本子系统的信息 $\ddot{q}_i(t)$ 、 $\dot{q}_i(t)$ 、 $q_i(t)$, 而且涉及到其它子系统的信息 $\ddot{q}_j(t)$ 、 $\dot{q}_j(t)$ 、 $q_j(t)$, $j \neq i$, 而后者在此刻是不知道的, 子系统 i 至多只有以前时刻的信息 $\ddot{q}_j(\tau)$ 、 $\dot{q}_j(\tau)$ 、 $q_j(\tau)$, $j \neq i$, $\tau < t$. 因此, 关连估计的关键, 在于如何利用这些信息对 $\ddot{q}_j(t)$ 、 $\dot{q}_j(t)$ 、 $q_j(t)$, $j \neq i$, 作出预估。

由于在控制过程中, 系统状态的变化有一定的连续性, 所以可用时间序列的方法对 $\ddot{q}_j(t)$ 作出预估。例如采用指数加权滑动平均预报法(EWMA, [2]), 可得到计算 $\hat{\ddot{q}}_j(t)$ 的递推公式

$$\hat{\ddot{q}}_j(t) = \hat{\ddot{q}}_j(t-1) + \lambda(\ddot{q}_j(t-1) - \hat{\ddot{q}}_j(t-1)). \quad (6)$$

其中 $0 < \lambda < 1$, 而 $\ddot{q}_j(t)$ 、 $q_j(t)$ 的估计值可由离散化差分公式近似给出

$$\hat{\dot{q}}_j(t) = \dot{q}_j(t-1) + T\ddot{q}_j(t-1),$$

$$\hat{q}_j(t) = q_j(t-1) + T\dot{q}_j(t-1) + \frac{T^2}{2}\ddot{q}_j(t-1). \quad (7)$$

式中 T 为采样周期。以式(6)、(7)的计算结果代入式(5), 便可以得到关连项 f_i 的估计值 $\hat{f}_i(t)$ 。由于估计过程不可避免地带有误差, 因而在用式(5)计算 f_i 时, 可事先对其具体形式进行分析, 舍去一些较小的项, 以减少在线计算量。

3.2 全分散信息结构, 但关连模型和期望轨线已知

在全分散信息结构下, 各子系统无法通过信息交换获取其它子系统的在线信息, 因而不能用式(6)、(7)估计其它子系统的状态。但若知道所有的关连模型和期望轨线, 则可将各子系统的期望状态 q_i^d 、 $\dot{q}_i^d$ 、 $\ddot{q}_i^d$ 近似地作为系统的实际状态代入关连模型计算 f_i 。这种策略使大量的在线计算可转化为离线进行。实际上, 这是在事先把所有的期望状态代入关连模型计算后, 把所得的 f_i 逐点地存储在相应的分散控制器内。与基于在线信息的关连预估相比, 这种开环预估方式下所得到的关连项有较大的误差, 但只要机器人的运动基本上是按期望目标控制的, 则所算得的结果仍能反映关连的主体。

3.3 全分散信息结构, 但关连模型与其它子系统的期望轨线未知

这种信息结构下的分散控制, 是在信息极其缺乏的情况下进行的。各分散控制器除了自己子系统的期望轨线和实测信息外, 对其它子系统的情况一无所知。通常, 它只能从子系统本身在控制过程中所获得的信息, 来猜测其它子系统对其的影响。这时, 关连项的影响只能看作是子系统所受到的外界扰动, 即在式(4)中, 把包括 f_i 在内的 e_i 看作是二阶线性系统受到的干扰, 并设法构造一个扰动估计器对其预估。文[3]介绍了一种扰动估计器的设计方法。设单输入单输出系统的动态特性可用离散卷积模型表示为

$$y(t) = \sum_{i=1}^N h_i[u(t-i) + d(t-i)]. \quad (8)$$

式中 h_i 为系统的单位脉冲响应系数, d 为加在输入端的扰动, u 为控制输入, y 为输出。由于 d 是未知的, 故只能用无扰动模型

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^N h_i u(t-i) \tag{9}$$

计算模型输出, 根据实测输出信息 $y(t)$, 可得到误差项

$$e(t) = y(t) - \hat{y}(t) = \sum_{i=1}^N h_i d(t-i).$$

由此可得

$$d(t-1) = [y(t) - \hat{y}(t) - \sum_{i=2}^N h_i d(t-i)]/h_1.$$

上式得到的是 $t-1$ 时刻的扰动, 如果扰动变化不大, 可用此式近似估计 t 时刻的扰动

$$\hat{d}(t) = [y(t) - \hat{y}(t) - \sum_{i=2}^N h_i \hat{d}(t+1-i)]/h_1. \tag{10}$$

它给出了一个理想的扰动估计器. 经取 z 变换, 可以得到

$$\hat{D}(z) = G_0(z)[y(z) - \hat{y}(z)].$$

其中

$$G_0(z) = \frac{1}{zH(z)}, \quad \text{而} \quad H(z) = \sum_{i=1}^N h_i z^{-i}.$$

可以证明, 若系统的传递函数 $H(s)$ 为一阶惯性环节时, $H(z)$ 的零点都在单位圆内, 即 $G_0(z)$ 稳定. 对于这里所讨论的机器人关节子系统, 式(4)为一个二阶系统, 但若它具有负实部的极点, 则可用一个一阶系统近似它, 即令

$$H(s) \approx H_1(s) = \frac{k}{1 + \tau s}.$$

在此情况下, 可设计出稳定的扰动估计器对关连项作出粗略的估计.

4 仿真实例

我们采用上述分散预测控制策略对 MOTOMAN LION 工业机器人前三个关节的跟踪控制进行了数字仿真.

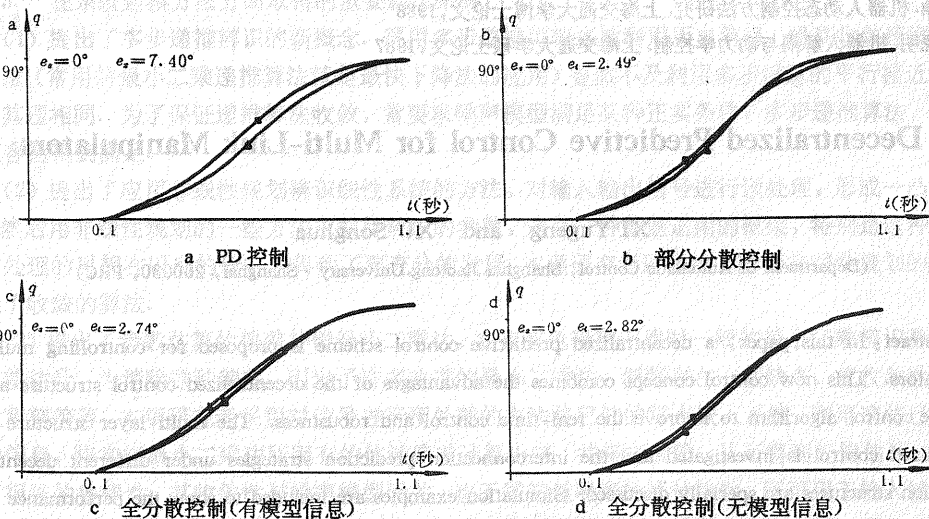


图 2 对光滑轨线的跟踪

图 2 是其对光滑轨线的跟踪结果, 这里要求每个关节从静止出发, 在前 0.5 秒均匀加速到 3.14 弧度/秒, 后 0.5 秒又均匀减速为零, 总共转过 90° 后保持静止. 图 a 至 d 分别

给出了采用 PD 控制与在上节三种信息结构下采用分散预测控制的关节运动, 其中 e_s 、 e_t 分别表示稳态误差和最大动态误差。为节省篇幅, 图中只画出了第三个关节运动的期望轨线(用■表示)和实际轨线(用▲表示)。由于对关连的影响作了适当的预测和补偿, 采用分散预测控制方法改善了跟踪的精度。

图 3 则给出了在有一步时延信息的部分分散结构下用分散预测控制对分段光滑期望轨线的跟踪结果。它也有较满意的响应。

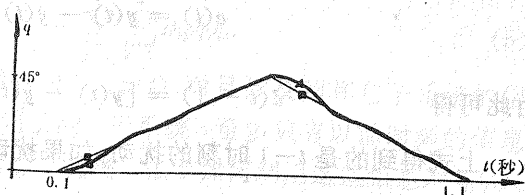


图 3 对分段光滑轨线的跟踪

5 结束语

本文把分散预测控制方法应用于多关节机器人的控制, 目的在于降低控制的复杂性和提高计算的实时性。这种方法在横向实现控制分散化, 便于用多微机系统并行处理, 提高在线计算的速度; 在纵向则采取信息分散化, 实现分层分目标的控制, 以降低每一层次模型和控制的复杂性。这种分层分散引起的信息不足, 可以采用多种预测手段加以补充, 以提高控制的性能。机器人这样一个复杂关连非线性大系统的控制, 通过这种分解和简化, 总体复杂性被分解为具有较少复杂性的常规控制。在这种综合结构下, 可以得到良好的控制性能和实时性。仿真实例表明了这种分散预测控制方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Schmidt, G. and Xi, Y.. A New Design Method for Digital Controllers based on Nonparametric Plant Models. in Applied Digital Control (ed.: Tzafestas, S. G.), North Holland, 1985, 93—109
- [2] Box, G.. Time Series Analysis: Forecasting and Control. Holden-Day, 1976
- [3] Yuan, P. et al.. Predictive Control using an Observer for Load Estimation. Proc. 25th CDC, Athens, 1986
- [4] 蔡自兴. 机器人原理及其应用. 长沙: 中南工业大学出版社, 1988
- [5] 陆鼎. 机器人动态控制方法研究. 上海交通大学博士论文, 1988
- [6] 包晓明. 机器人解耦与动力学控制. 上海交通大学硕士论文, 1987

Decentralized Predictive Control for Multi-Link Manipulators

XI Yugeng and XU Songhua

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

Abstract: In this paper, a decentralized predictive control scheme is proposed for controlling multi-link manipulators. This new control concept combines the advantages of the decentralized control structure and the predictive control algorithm to improve the real-time control and robustness. The multi-layer structure of the decentralized control is investigated and the interconnection prediction strategies under different decentralized information structures are specially discussed. Simulation examples are included to show the performance of this new control method.

Key words: robot control; decentralized control; predictive control; dynamic matrix control; information structure

本文作者简介

席裕庚 1968年毕业于哈尔滨军事工程学院, 1984年在德国获工学博士学位, 现为上海交通大学自动控制系教授、自动控制理论及应用博士生导师, 主要从事复杂系统控制理论的研究, 目前的主要研究领域为复杂工业过程的优化控制及智能机器人控制。

许颂华 1984年毕业于上海交通大学自动控制系并留校任教, 1989年在该校获硕士学位, 现在深圳中科院安科公司从事高科技研究开发工作。

《系统建模方法及自适应控制系统的研究》简介*

主要研究者: 冯纯伯 郑卫新 叶 桦 王海凤

(东南大学自动化研究所)

本项研究在系统建模方法和自适应控制方面取得了一些成果, 主要有:

1. 对复合动态系统的输入输出特性作了深入分析, 扩展了无源性定理及 V. M. Popov 的超稳定性判据, 使原有结果成为特例。为分析和改进设计递推辨识算法及自适应控制方案提供了理论工具, 还可用于设计能保证全局稳定的非线性校正系统、扩展 V. M. Popov 的绝对稳定性判据等。

2. 以对反馈系统的无源性分析为理论根据, 提出了多步递推参数估计的新算法, 可保证有更好的收敛性; 提出了一种算法简单但鲁棒性强的自适应控制方案。理论分析和仿真结果表明, 在有未建模动态特性存在时, 原有的一些自适应控制系统可能失稳, 本项研究者对这种失稳现象的原因作了较深入的分析, 并提出了一种鲁棒性很强的控制方案, 引入一种逻辑切换, 将可能引起参数自适应过程发散的误差信号反号之后再引入自适应控制系统, 从而能保证即使有未建模动态特性存在时仍然全局稳定, 解决了鲁棒性问题。

3. 在系统建模方法方面取得的重要新结果有:

(1) 提出了多步递推辨识的新概念。采用多步递推可较多地利用历史信息, 提高收敛速度, 如最快下降法(常用的最小二乘递推算法就是最快下降法的应用)显然不及利用多步信息的平行接近法收敛更快。其理相同。为了保证递推算法收敛, 常要求噪声模型满足某种正实条件, 多步递推算法, 使正实条件很容易得到满足。

(2) 提出了应用非线性规划辨识线性系统的方法, 对输入输出信号进行预处理, 形成一凸的目标函数, 然后用非线性规划的一些方法求取得辨识的参数, 这是一种普遍适用的框架, 特别是这种对信号进行预处理的思想在以后的研究中得到了更充分的发展。本项研究者还提出了时变非线性规划的新概念并给出了收敛的算法。

(3) 提出了参数估算的偏差补偿最小二乘法, 在有有色噪声干扰时一般的最小二乘辨识算法只能给出有差估计, 为消除这种偏差, 引出了许多改进的最小二乘法, 但都存在一些缺点, 或收敛性不好或条件太苛刻等等。本项研究者采用对信号进行预处理的方法将已知的零点嵌入系统, 利用这些已知零点提供的信息, 将常规最小二乘法所固有的估计偏差计算出来, 并将之消除, 从而得到无偏估计。这种算法具有很强的鲁棒性, 其收敛性与噪声模型无关, 也无需知道噪声的统计特性, 既可用于输入输出信号中均有噪声和相关噪声的情况, 又可用于开环及闭环时滞系统的辨识和降阶模型。这种对信号进行预处理的思想还可进一步的发展, 例如可用于传递函数的特征提取。

* 该研究成果获 1991 年国家自然科学奖四等奖。