

文章编号: 1001-0920(2004)07-0759-05

参数不确定机器人分散鲁棒跟踪控制

石宗英, 钟宜生, 徐文立
(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘要: 提出了一种新的参数不确定机器人分散控制器设计方法。首先将关节子系统的动力学模型分解为人工标称模型和非线性时变不确定模型两部分; 然后分别设计相应的标称控制器和鲁棒补偿器。标称控制器使得标称闭环系统具有理想的跟踪性能; 鲁棒补偿器可以抑制参数不确定和关节间非线性耦合等因素的影响, 实现鲁棒跟踪。所设计的控制器只需要局部关节的位置反馈, 具有易于实现和可在线调整的优点。仿真结果说明了该方法的有效性。

关键词: 机器人; 分散鲁棒跟踪控制; 鲁棒补偿器; 在线调整

中图分类号: TP24

文献标识码: A

Decentralized robust tracking control for robots with uncertain parameters

SHI Zong-ying, ZHONG Yi-sheng, XU Wen-li

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China. Correspondent: SHI Zong-ying, E-mail: szy@mail.tsinghua.edu.cn)

Abstract: A new design method of decentralized robust tracking controller for robots with uncertain parameters is proposed. The dynamics of the joint subsystems are divided into two parts: an artificial nominal model and a nonlinear time-varying uncertain model. Then a corresponding nominal controller and a robust compensator are designed. The nominal controller enables the nominal closed-loop system to achieve desired tracking properties, and the robust compensator reduces the influence of the parameter uncertainties and the nonlinear couplings among the joints. Only using local position feedbacks, the controller has the advantage of easy realization and tuning on-line. The simulation results show the effectiveness of the method.

Key words: robot; decentralized robust tracking control; robust compensator; tuning on-line

1 引言

从理论上讲, 机器人的运动可由一组高度非线性、强耦合的动力学方程描述。但由于实际上机器人物理参数的准确值通常难以获得, 摩擦力矩难以准确建模, 负载力矩随任务的不同而变化以及存在外界干扰等原因, 描述机器人运动的动力学方程不可避免地存在不确定性。为此, 研究者们提出了多种机器人鲁棒控制方法^[1]。现有的机器人鲁棒控制律大多采用集中控制方式, 这种相互耦合的控制结构

导致控制器设计复杂、实现困难, 从而限制了实际应用。而分散控制在易实现性和容错性等方面比集中控制更具优势。对机器人而言, 分散控制就是每个关节具有各自独立的控制器, 而且控制器只需要局部关节状态反馈。目前, 机器人分散鲁棒控制方法主要包括: PD + 非线性补偿方法^[2,3], 鲁棒自适应方法^[4-6], 基于 Riccati 方程方法^[7]和基于 LM I 的方法^[8]等。

本文将文献[9~11]提出的基于信号补偿的鲁

收稿日期: 2003-06-30; 修回日期: 2003-10-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(69934010); 清华大学985基金资助项目(081100700)。

作者简介: 石宗英(1969—), 女, 重庆人, 讲师, 博士生, 从事机器人规划、运动控制等研究; 徐文立(1947—), 男, 江苏扬州人, 教授, 博士生导师, 从事运动体控制、计算机视觉等研究。

棒控制方法用于多自由度机器人的控制与上述文献所讨论的问题不同,多自由度机器人是多输入多输出系统,各个控制回路之间存在非线性不确定耦合。本文提出一种机器人分散鲁棒跟踪控制器设计方法,并给出了稳定性分析。采用本文方法设计鲁棒控制器时,不需要已知机器人不确定模型的具体形式和不确定上界的值,控制器参数可以在线调整。

2 问题描述

在不考虑静态摩擦和其他干扰的情况下, n 连杆刚体机器人的动力学模型可用拉格朗日-欧拉方程表示为

$$M(\xi_0, \theta) \ddot{\theta} + C(\xi_0, \theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + g(\xi_0, \theta) = \tau \quad (1)$$

其中: ξ_0 为不确定的机构参数向量,包括连杆质量、负载等,它在已知的有界集合 $\Xi_0 (C \mathbf{R}^l)$ 上取值;

$\theta \in \mathbf{R}^n$ 为关节角位移; $\tau \in \mathbf{R}^n$ 为关节作用力矩; $M(\xi_0, \theta) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为机器人的惯量矩阵,是对称正定阵; $C(\xi_0, \theta, \dot{\theta}) \in \mathbf{R}^n$ 为离心和哥氏力矩; $g(\xi_0, \theta) \in \mathbf{R}^n$ 为重力矩。

假设 1 对于任意 $\xi_0 \in \Xi_0$ 和所有可能的运行状态,惯量矩阵 $M(\xi_0, \theta)$ 的逆 $M^{-1}(\xi_0, \theta)$ 存在且有界。

由假设 1, 式(1)可改写为

$$\ddot{\theta} = H(\xi_0, \theta) [-C(\xi_0, \theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} - g(\xi_0, \theta) + \tau], \quad (2)$$

其中 $H(\xi_0, \theta) = M^{-1}(\xi_0, \theta)$ 。

由上述方程可知,机器人各关节的动态特性高度耦合。在实际机器人系统中,通常每个关节由一个独立的驱动器驱动,因此将每个关节看作一个子系统,称为关节子系统。由式(2)可得第 i 个关节子系统的动力学方程

$$\ddot{\theta}_i = - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n H_{ik}(\xi_0, \theta) C_{kj}(\xi_0, \theta, \dot{\theta}) \dot{\theta}_j - \sum_{j=1}^n H_{ij}(\xi_0, \theta) g_j(\xi_0, \theta) + \sum_{j=1}^n H_{ij}(\xi_0, \theta) \tau_j \quad (3)$$

其中: $\ddot{\theta}_i$, $\dot{\theta}_i$ 和 τ_i 分别是向量 $\ddot{\theta}$, $\dot{\theta}$ 和 τ 的第 i 个元素; $g_j(\xi_0, \theta)$ 是向量 $g(\xi_0, \theta)$ 的第 j 个元素; $H_{ij}(\xi_0, \theta)$ 和 $C_{ij}(\xi_0, \theta, \dot{\theta})$ 分别是矩阵 $H(\xi_0, \theta)$ 和 $C(\xi_0, \theta, \dot{\theta})$ 的第 (i, j) 元素。

假设施加于关节子系统的指令信号为 r , 从指令信号到关节角的理想输入/输出特性由如下参考

模型指定:

$$y_m = W_m(s) r, \quad W_m(s) = \frac{b_m}{D_m(s)} = \frac{b_m}{s^2 + a_m s + b_m} \quad (4)$$

其中: r 为有界、连续的指令信号; a_m 和 b_m 为常数, a_m 和 b_m 的值可利用二阶系统特征方程的标准型,根据系统跟踪性能要求(如阶跃响应的上升时间和超调量)确定。对于不同的关节,指令信号通常是不同的,也可以分别指定参考模型,但为简单起见,这里在表示上没有明确标记。

本文将对式(1)描述的存在不确定性参数的多关节机器人,设计线性定常分散控制器,实现各关节以参考模型(4)指定的动态特性对给定指令信号的鲁棒跟踪。

3 鲁棒控制器设计

关节子系统鲁棒控制器的设计采用基于信号补偿的鲁棒控制方法^[9-11]。控制器的设计分两步:首先对关节子系统人为引入标称模型(称为人工标称模型),并设计相应的标称控制器,使标称系统的闭环输入/输出特性与参考模型完全相同;然后将实际关节子系统特性与人工标称模型特性的差异对控制性能的影响和不确定性所产生的影响看作等价干扰的影响,设计鲁棒补偿器,以抑制其对闭环系统控制性能的影响,实现期望的鲁棒控制性能。

3.1 标称控制器设计

在关节子系统的模型(3)中,如果忽略各关节子系统之间的耦合,并且选择一个工作点为标称工作点,则第 i 个关节子系统可描述为

$$\ddot{\theta}_i + a_0 \dot{\theta}_i + b_0 \theta_i = k_0 \tau_i, \quad (5)$$

或

$$\theta_i = G_0(s) \tau_i, \quad (6)$$

其中 $G_0(s) = \frac{k_0}{D_p(s)} = \frac{k_0}{s^2 + a_0 s + b_0}$ 。

因为实际关节子系统在任何工作点的模型都可能不等于式(5)或(6)中的模型,此模型是为了设计鲁棒跟踪控制而人为引入的,故称为人工标称模型。对于不同的关节子系统,人工标称模型可以不同,但为表示简洁,这里没有区别标记。

由下述的鲁棒性分析可知,人工标称模型的选取具有很大的自由度,为了简化控制器的结构,本文选取

$$D_p(s) = D_m(s), k_0 = 1$$

设标称控制量为 u_i , 则对于人工标称模型,当初始条件为零时,为使 $\theta = y_m$, 应满足

$$u_i = b_m r, \quad (7)$$

即标称控制器是一前向比例控制

3.2 鲁棒补偿器设计

对于实际关节子系统, 实际模型与人工标称模型间存在差异, 此差异对关节子系统闭环控制的影响可看作外部扰动(用 q_i 表示, 称为等价干扰)的影响, 而实际关节子系统可描述为

$$D_m(s)\theta = \tau_i + q_i, \quad (8)$$

其中

$$q_i = a_m \dot{\theta} + b_m \theta - \tau_i - \sum_{j=1}^n H_{ik}(\xi_0, \theta) C_{kj}(\xi_0, \theta) \ddot{\theta} - \sum_{j=1}^n H_{ij}(\xi_0, \theta) g_j(\xi_0, \theta) + \sum_{j=1}^n H_{ij}(\xi_0, \theta) \tau_j$$

令实际控制输入为

$$\tau_i = u_i + v_i, \quad (9)$$

其中 v_i 为待设计的鲁棒补偿器的输出 则

$$D_m(s)\theta = b_m r + v_i + q_i$$

为消除等价干扰 q_i 对闭环系统的影响, 并保证它可以实现, 构造如下鲁棒补偿器:

$$v_i = -F(s)q_i = -F(s)[D_m(s)\theta - \tau_i] = \frac{F(s)}{1 - F(s)}[u_i - D_m(s)\theta], \quad (10)$$

其中 $F(s)$ 为鲁棒滤波器, 具有如下形式:

$$F(s) = \frac{f}{s+f} \cdot \frac{g}{s+g},$$

其中 f 和 g 为常数 由式(4) 和式(7), 有

$$v_i = \frac{fg}{s(s+f+g)} [b_m r - (s^2 + a_m s + b_m)\theta] = -k_a \theta + k_b \frac{f+g}{s+f+g} \left[k_c \theta + \frac{b_m}{s} (r - \theta) \right]. \quad (11)$$

其中: $k_a = fg, k_b = \frac{fg}{f+g}, k_c = f+g - a_m$.

将式(7) 和(11) 代入(9) 得到实际的控制量

$$\tau_i = u_i + v_i = b_m r - k_a \theta + k_b \frac{f+g}{s+f+g} \left[k_c \theta + \frac{b_m}{s} (r - \theta) \right] \quad (12)$$

对于第 i 个关节子系统, 设 $r = \theta_d$ 则闭环控制系统如图 1 所示

由式(12) 和图 1 可知, 所设计的控制器是分散控制器, 即各个关节子系统均对应一个局部反馈控制器 各关节子系统的控制器均是二阶线性定常控

制器, 仅利用了本关节的角位移信号和外部指令信号, 易于实现, 而且避免了速度反馈可能带来的噪声问题

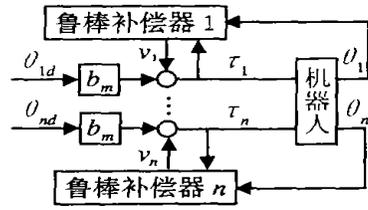


图 1 机器人分散鲁棒控制系统

4 控制性能分析和参数在线调节

定理 1 当关节子系统的控制量构成如式(12)

时, 若所有的初始条件均为零, 则对任意给定的常数 $\epsilon > 0$, 当 f 和 g 充分大时, 有

$$\theta - y_m = \sup_t |\theta(t) - y_m(t)| < \epsilon$$

成立.

证明 可选取 $f = \eta g, \eta > 1$ 为常数 如果所有的初始条件均为零, 则由式(7) ~ (10) 有

$$\theta = \frac{b_m}{D_m(s)} r + \frac{1}{D_m(s)} [1 - F(s)] q_i = y_m + \left[\frac{As+B}{s^2 + a_m s + b_m} + \frac{C}{s+f} + \frac{D}{s+g} \right] q_i$$

其中

$$C = \frac{\eta}{\eta-1} \left[\frac{g}{\eta g^2 - a_m \eta g + b_m} \right],$$

$$D = \frac{\eta}{\eta-1} \left[\frac{-g}{g^2 - a_m g + b_m} \right],$$

$$A = -C - D, B = - \left[\frac{b_m}{f} C + \frac{b_m}{g} D \right].$$

当 g 充分大时, 有

$$|C| < \frac{1}{\eta-1} \cdot \frac{1}{\eta g - a_m}, |D| < \frac{\eta}{\eta-1} \cdot \frac{1}{g - a_m},$$

$$|A| < \frac{(\eta+1)g - a_m}{(g - a_m)^2},$$

$$|B| < \frac{b_m}{g \eta (\eta-1)} \left[\frac{\eta}{g - a_m} + \frac{1}{\eta g - a_m} \right].$$

可见 $|C|, |D|, |A| \rightarrow 0(1/g), |B| \rightarrow 0(1/g^2)$.

对于任意 ξ_0, ξ_0 和所有可能的运行状态, 由于机器人机构的约束和实际驱动力矩的限制, 存在常数 $\zeta > 0$, 使 $q_i < \zeta$ 成立 故当初始条件均为零, 且 g 充分大时, 存在常数 $\xi > 0$, 使 $\theta - y_m$

$< \frac{\xi}{g} q_i < \frac{\xi \zeta}{g}$ 成立 若取 $g > \xi \zeta / \epsilon$, 则定理的

结论成立

上述证明中常数 ξ 很容易求得 根据对机器人

机构的约束和实际驱动力矩的限制以及不确定参数的取值范围 Θ_0 的先验知识, 可以确定常数 ζ 。由常数 ξ 和 ζ 能够确定 g 和 f 的取值

由上述证明可知, 采用不同的人工标称模型, 会得到 q_i 的不同上界 ζ , 而这只会影响 g 的理论计算值的大小, 而不会改变定理 1 的结论。因此, 人工标称模型的选取具有一定的自由度。为得到简单的控制器, 选取人工标称模型满足 $D_p(s) = D_m(s)$ 。

在实际应用中, 不必进行上述证明中繁琐的分析和不确定上界的估算, 可通过在线调整来确定鲁棒补偿器的参数 f 和 g : 1) 取常数 $\eta > 1$, 令 $f = \eta g$; 2) 根据式 (12) 构成控制器, 并闭环控制回路; 3) 从某一个值开始调节 g 的取值, 直到获得满意的跟踪性能为止

因为只有一个需要调节的参数, 且只需作单方向调节 (增大), 所以上述参数在线调整很容易实现, 甚至比传统的 PD 控制器的在线调整还要容易, 并且各个关节子系统的控制器参数的调节是相对独立的。但是, 在实际应用中, 不宜选取 g 的值过大, 否则, 可能因非零初始条件或量测噪声导致过大的控制输入

对于实际机器人系统, 其不确定参数的范围一般不易确定。因此, 在实际应用中, 本方法的控制器参数可在线调整的特点具有独特的优越性

5 仿真结果

为了验证控制器参数的可单向调节特性和该方法对参数不确定机器人控制的有效性, 以两自由度机器人为控制对象进行仿真。为便于比较, 模型参数 (见表 1) 和关节参考轨迹同文献 [2]

表 1 两自由度机器人的标称参数

参数项目	符号	连杆 1	连杆 2
连杆长度 /m	l_i	0.5	0.25
关节轴到杆质心的距离 /m	r_i	0.25	0.15
连杆质量 /kg	m_i	4.0	2.0
连杆转动惯量 /($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	I_i	1.0	0.8

参考轨迹为

$$\theta_d = 0.2 + \sin(18t) + \sin(20t),$$

$$\dot{\theta}_d = -1.7 + 0.8\cos(22t) + \cos(16t).$$

设初始位置误差 $e = [0.2 \ 0.1]^T$, 初始速度误差 $\dot{e} = [38 \ 0]^T$ 。

在鲁棒控制器的设计中, 参考模型按上升时间 $t_r = 0.04 \text{ s}$, 超调量 $\sigma = 0.0001$ 选取, 并取 $\eta = 5$ 。从 800 开始调节 g 值。图 2 给出了 $g = 1200, g$

$= 1800$ 和 $g = 2400$ 三种滤波器常数取值对应的跟踪误差 ($y_m - \theta$)。为了区分不同 g 值情况下的跟踪结果, 将以上 3 种 g 值对应的控制依次简记为 SC_1, SC_2 和 SC_3 。图 2 的结果表明, 随着 g 值的逐渐增大, 跟踪误差逐渐减小, 这验证了控制器参数的可单向调节特性。图 3 和图 4 分别给出了机器人参数确定和参数不确定 (物理参数的实际值为标称值的 1.5 倍) 情况下, SC_2 方法与文献 [2] 的 PD + NL (PD-plus-nonlinear) 方法的跟踪误差 ($\theta_d - \theta$) 比较。图 3 和图 4 的结果表明, 采用本文提出的控制方法, 在参数确定和不确定两种情况下都能保证良好跟踪, 并且跟踪效果优于上述 PD + NL 方法。在参数不确定情况下, PD + NL 方法的跟踪结果与参

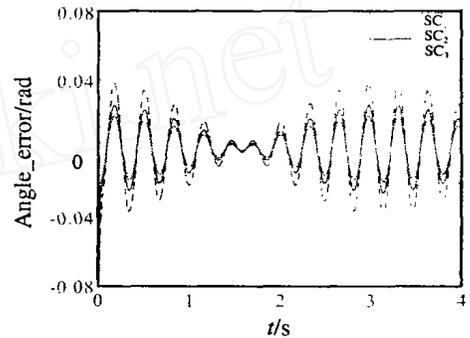


图 2 不同 g 值下关节 1 的位置跟踪误差

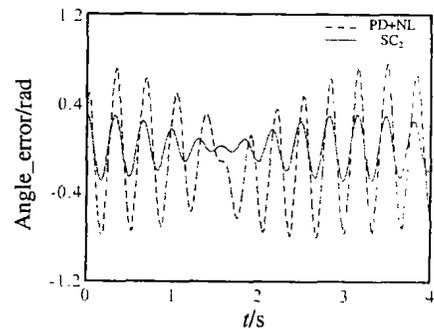


图 3 参数确定情况下关节 1 位置跟踪误差

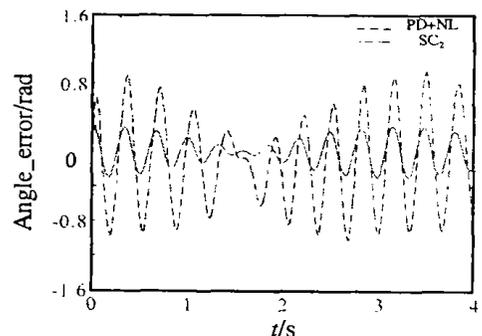


图 4 参数不确定情况下关节 1 位置跟踪误差

数确定时相比明显变差, 而用本文方法设计的控制器在适当的 g 值下, 可保证跟踪误差与模型确定时接近, 需要指出的是, 此时跟踪误差主要来源于参考模型的相位滞后 这个结果验证了该方法对参数不确定机器人控制的有效性

6 结 论

本文提出的机器人鲁棒分散控制器是具有两环结构的线性时不变控制器 该控制器仅需要位置反馈, 避免了速度反馈可能带来的量测噪声等问题 因为鲁棒补偿器是基于内部信号产生的, 因而不需要已知不确定模型的具体形式 更重要的是, 控制器的调节参数只需作单方向调整, 使得本方法具有独特的优势, 即可实现控制参数的在线调整且不必估算不确定上界 这些特点使该控制器具有良好的适应性, 易于工程实现

参考文献(References):

- [1] Sage H G, De Mathelin M F. Robust control of robot manipulators: A survey [J]. *Int J Control*, 1999, 72 (16): 1498-1522
- [2] Liu M. Decentralized PD and robust nonlinear control for robot manipulators[J]. *J of Intelligent and Robotic Systems: Theory & Applications*, 1997, 20(2-4): 319-332
- [3] Tang Y, Guerrero G. Decentralized robust control of robot manipulators [A]. *ACC98 [C]*. Philadelphia, 1998 922-926
- [4] Fu L C. Robust adaptive decentralized control of robot manipulators [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(1): 106-110
- [5] 代颖, 施颂椒. 基于非线性滑动模的机器人鲁棒自适应分散控制策略[J]. *上海交通大学学报*, 2000, 34(12): 1694-1698
(Dai Y, Shi S J. Robust adaptive decentralized control strategies for robot manipulators based on nonlinear sliding mode [J]. *J of Shanghai Jiaotong University*, 2000, 34(12): 1694-1698)
- [6] 王洪斌, 宋佐时. 一种改进的机器人鲁棒自适应分散控制策略[A]. *WCICA 2002 [C]*. Shanghai, 2002 664-667.
- [7] Wang J Q, Wend H D. Robust decentralized control of robot manipulators [J]. *Int J Systems Science*, 1999, 30 (3): 323-330
- [8] 唐朝晖, 吴敏, 桂卫华. 基于LM I方法的机器人系统分散鲁棒控制[J]. *高技术通讯*, 2000, (8): 76-79
(Tang Z H, Wu M, Gui W H. Decentralized robust control of robot systems based on LM I approach [J]. *High Technology Letter*, 2000, (8): 76-79)
- [9] 钟宜生. 基于信号补偿的鲁棒控制方法[J]. *清华大学学报*, 2003, 43(4): 536-542
(Zhong Y S. Robust control based on signal compensator [J]. *J of Tsinghua University*, 2003, 43(4): 536-542)
- [10] Zhong Yisheng. Robust output tracking control of SISO plants with multiple operating points and with parametric and unconstructed uncertainties [J]. *Int J of Control*, 2002, 75(4): 219-241.
- [11] Zhong Yisheng. Robust tracking control for a class of nonlinear time-varying uncertain systems with unmodelled dynamics [A]. *Proc 21th Chinese Control Conf [C]*. Hangzhou, 2002

(上接第758页)

参考文献(References):

- [1] Consiglo A, Zenios S A. Designing portfolios of financial products via integrated simulation and optimization models[J]. *Operation Research*, 1999, 47(2): 195-208
- [2] Homer M R, Zenios S A. The productivity of financial intermediation and the technology of financial product management [J]. *Operation Research*, 1995, 43 (6): 970-982
- [3] Dowd K. *Beyond Value at Risk* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1998
- [4] 许大志, 郑祖康. 非参数方法在金融风险模型中的应用[J]. *系统工程*, 1999, 17(5): 25-32
- [5] Konno H, Yamazaki H A. Mean-absolute deviation portfolio optimization model and its application to tokyo stock market [J]. *Management Science*, 1991, 37 (5): 519-531.
- [6] 方述诚, 汪定伟. 模糊数学与模糊优化[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 248-252
- [7] 周明, 孙树林. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999 172-174