

机器人的分散控制

胡晏如 常文森

(自动控制系)

摘要 本论文提出了一种新的机器人分散控制方法,这种分散控制方法把机器人系统的每个自由度作为一个子系统,首先从解耦子系统模型综合出N个分散线性控制器,然后在每个子系统内引入一个自适应控制环补偿非线性耦合项的影响。这种分散控制器的优点是:控制器结构简单、计算量小、易于用多微机系统实现并行控制。

关键词 机器人控制,分散控制

1. 引言

近年来,工业机器人的控制问题已经引起了人们的广泛兴趣,自由度为六或六个以上的工业机器人系统是一个具有强耦合、高非线性的大型机械系统。为了控制这样一个复杂的大系统,人们已经提出了许多种控制方法、经典控制方法,非线性反馈控制方法,微分几何控制方法,自适应控制方法,分散控制方法等。这些方法都在不同程度上解决了机器人的控制问题。分散控制理论^[4]是用于大系统控制的强有力工具。应用分散控制方法来控制机器人系统能给出一个简单的、低维的、可并行处理的控制器结构。Vukobratovic 和 Stokic^{[5][6]}已经应用分散控制理论来控制机器人系统,将机器人系统的每个自由度作为一个子系统,根据各子系统的期望输出,从解耦的子系统模型,综合出各子系统的期望程序控制。然后利用各子系统的线性摄动模型,求出各子系统的控制增量。这种控制方法的优点在于:控制器结构简单,易于实现。但是,当各子系统之间的耦合及参数变化比较严重时,求出的控制就不能使系统在期望的轨迹附近稳定。因此,就必须引入全局控制,这就使系统的控制器结构变得很复杂。

本论文将提出一种新的分散控制方案、首先从解耦子系统模型,求出各子系统的线性控制律。然后考虑非线性耦合项的影响,在每个子系统内引入一个自适应环,补偿这种耦合项的影响。

2. 机器人的动力学模型

机器人的动力学模型一般可表示为:

本文 1987 年 5 月 30 日收到

$$D(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + R\dot{q} + G(q) = U \quad (1)$$

上式中的 $D(q)$ 为 $N \times N$ 的惯性矩阵, $H(q, \dot{q})$ 为 $N \times 1$ 的向心力和哥氏力向量, R 为 $N \times N$ 的摩擦系数矩阵, $G(q)$ 为 $N \times 1$ 的重力向量, q 为 $N \times 1$ 的广义位置向量, U 为 $N \times 1$ 的广义力向量。

为了进行分散控制, 文献^{[2][5]}将每个关节的动力学方程作为一个子系统, 建立另外一种形式的动力学模型, 以状态方程的形式描述为:

$$\dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + b_i U_i(t) + F_i(t) \quad i=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & a_{i2}^i \end{bmatrix} \quad b_i = \begin{bmatrix} 0 \\ b_{i2}^i \end{bmatrix}$$

$$x_i(t) = \begin{bmatrix} q_i(t) \\ \dot{q}_i(t) \end{bmatrix} \quad F_i(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ f_i(t) \end{bmatrix}$$

$q_i(t)$ 为第 i 个关节的广义位置, $U_i(t)$ 为第 i 个关节的广义力, $f_i(t)$ 为包括所有的非线性、参数变化和耦合的影响项。方程(2)以子系统的形式描述了大型机器人系统的动力学模型。下面我们将利用(2)来综合分散控制器。

3. 控制器综合

控制器综合问题描述为: 对于给定的机器人各子系统的期望输出轨线, 根据系统的运动方程(2), 综合出 N 个分散控制器, 以致于使机器人各子系统实际运动轨迹跟踪它的期望轨迹。

我们分两步综合分散控制器

1. 局部线性模型跟随控制器设计

首先利用机器人系统的解耦动力学模型, 也就是忽略了耦合项 $F_i(t)$ 的方程(2), 设计 N 个分散控制器, 如图1所示, 以致于使各子系统完全跟踪参考模型:

$$\dot{x}_{m_i}(t) = A_{m_i} x_{m_i}(t) + b_{m_i} U_{m_i}(t) \quad i=1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中 $x_{m_i}(t) = [x_{m_i1}^i(t), x_{m_i2}^i(t)]^T$ 为参考模型的输出向量, $U_{m_i}(t)$ 为参考模型的输入。

$$A_{m_i} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_{m_i21}^i & a_{m_i22}^i \end{bmatrix} \quad b_{m_i} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_{m_i2}^i \end{bmatrix}$$

且 A_{m_i} 满足下面的条件:

$$\lambda_j(A_{m_i}) \in C_- \quad i=1, 2, \dots, N, j=1, 2 \quad (4)$$

C_- 表示开左半平面, $\lambda_j(\cdot)$ 表示括号内矩阵的第 j 个特征值。

我们定义跟踪误差信号: $e_i(t) = x_{m_i}(t) - x_i(t)$, 从机器人的解耦子系统运动方程和参考模型(3)得到误差运动方程:

$$\dot{e}_i(t) = (A_{m_i} - b_{m_i} K_{m_i}) e_i(t) + (A_{m_i} - A_i + b_i (K_{p_i} - K_{m_i})) x_i(t) + (b_{m_i} - b_i K_{u_i}) U_{m_i}(t) \quad i=1, 2, \dots, N \quad (5)$$

为了保证完全的模型跟随, 由误差运动方程(5)可推出应满足下列条件:

$$b_i (K_{m_i} - K_{p_i}) = A_{m_i} - A_i \quad i=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

$$b_i K_{u_i} = b_{m_i} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (7)$$

$$\lambda_j(A_{m_i} - b_i K_{m_i}) \in C_- \quad i=1, 2, \dots, N, \quad j=1, 2 \quad (8)$$

为了使状态扰动对对象的影响减少到最小，我们应用最优控制中的最优跟踪技术来计算 K_{p_i} ：

$$K_{p_i} = r_i^{-1} b_i^T P_i' \quad i=1, 2, \dots, N \quad (9)$$

式中 $r_i > 0$, P_i' 是下列黎卡提方程的正定解

$$A_i^T P_i' + P_i' A_i - P_i' b_i r_i^{-1} b_i^T P_i' + Q_i' = 0 \quad i=1, 2, \dots, N \quad (10)$$

Q_i' 为非负定阵。因此，能使模型完全跟踪并且具有抗干扰能力的线性分散控制器应满足条件(6)~(9)。

方程(6), (7)中, $K_{m_i} - K_{p_i}$ 和 K_{u_i} 有解的充分条件为

$$\begin{cases} (I_2 - b_i b_i^+) (A_{m_i} - A_i) = 0 \\ (I_2 - b_i b_i^+) b_{m_i} = 0 \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (11)$$

式中 b_i^+ 为 b_i 的广义左逆, $b_i^+ = (b_i^T b_i)^{-1} b_i^T$, I_2 为 2×2 的单位阵, 从 A_i 、 b_i 、 A_{m_i} 和 b_{m_i} 的结构形式可知条件(11)总能满足。因此, 方程(6)(7)可解, 利用(9), K_{m_i} 和 K_{u_i} 的解可表示为:

$$K_{m_i} = r_i^{-1} b_i^T P_i' + b_i^+ (A_{m_i} - A_i) \quad i=1, 2, \dots, N \quad (12)$$

$$K_{u_i} = b_i^+ b_{m_i} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (13)$$

最后我们选择 $a_{m_{21}}^i$ 、 $a_{m_{22}}^i$ 同时满足条件(4)和(8), $a_{m_{21}}^i$ 、 $a_{m_{22}}^i$ 选择如下:

$$\begin{cases} a_{m_{21}}^i < \min\{b_{i2}^+ K_{m_1}^i, 0\} \\ a_{m_{22}}^i < \min\{b_{i2}^+ K_{m_2}^i, 0\} \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (14)$$

式中 $K_{m_1}^i$ 、 $K_{m_2}^i$ 为 $K_{m_i} = [K_{m_1}^i, K_{m_2}^i]$ 的分量。

我们求得的线性控制输入为:

$$U_i^{(1)}(t) = -K_{p_i} x_i(t) + K_{u_i} U_{m_i}(t) + K_{m_i} x_{m_i}(t) \quad i=1, 2, \dots, N \quad (15)$$

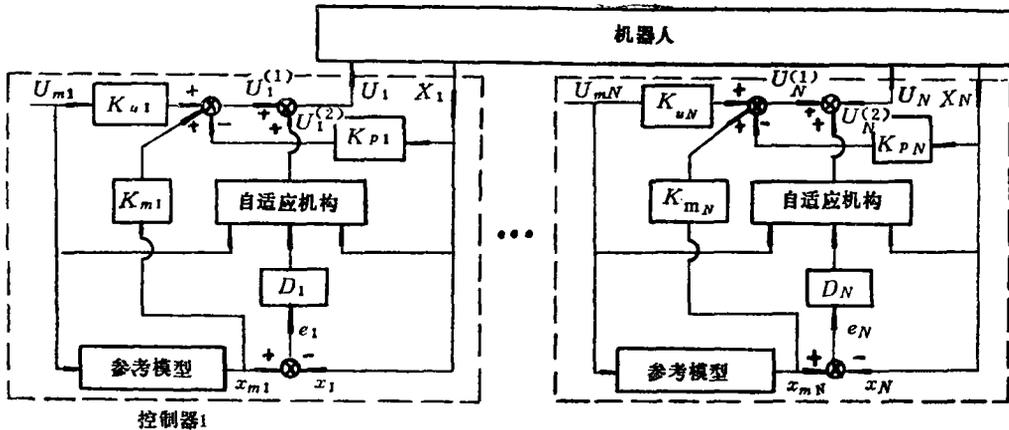


图 1 控制器结构

2. 局部自适应控制器设计

前面求得的线性控制 $U_i^{(1)}(t)$ 能使解耦子系统跟随参考模型。但是, 各子系统之间存在非线性耦合项 $F_i(t)$, 它影响机器人系统的动态响应, 为了补偿 $F_i(t)$ 的影响, 增

强抗干扰能力,改善系统的跟踪性能,每个子系统内引入一个自适应环如图1。

我们选择如下自适应信号:

$$U_i^{(2)}(t) = \Delta K_{pi}(e_i, t)x_i(t) + \Delta K_{ui}(e_i, t)U_{mi}(t) \quad i=1, 2, \dots, N \quad (16)$$

自适应机构产生两个时变增益, $\Delta K_{pi}(e_i, t)$; $\Delta K_{ui}(e_i, t)$ 它的目标是在一定条件下,保证广义误差趋于零。

我们采用的自适应机构为:

$$V_i = D_i e_i \quad i=1, 2, \dots, N \quad (17)$$

$$\Delta K_{pi}(e_i, t) = \int_0^t F_i V_i (G_i x_i)^T d\tau + F_i' V_i (G_i x_i)^T + \Delta K_{pi}(0) \quad i=1, 2, \dots, N \quad (18)$$

$$\Delta K_{ui}(e_i, t) = \int_0^t M_i V_i (N_i U_{mi}) d\tau + M_i' V_i (N_i U_{mi}) + \Delta K_{ui}(0) \quad i=1, 2, \dots, N \quad (19)$$

式中 $F_i, F_i', M_i, M_i', N_i > 0$ 的常数, G_i 为正定阵。选择 D_i , 使 D_i 满足:

$$D_i = b_i^T P_i \quad P_i > 0 \quad (20)$$

式中 P_i 满足李雅普诺夫方程:

$$A_{mi}^T P_i + P_i A_{mi} = -Q_i \quad Q_i > 0, (i=1, 2, \dots, N) \quad (21)$$

至此,我们已经综合出 N 个分散控制器,每个分散控制器由线性控制器和自适应控制器两部分组成,这 N 个分散控制器为:

$$U_i(t) = -[K_{pi} - \Delta K_{pi}(e_i, t)]x_i(t) + [K_{ui} + \Delta K_{ui}(e_i, t)]U_{mi}(t) + K_{mi}x_{mi}(t) \quad i=1, 2, \dots, N \quad (22)$$

4. 仿真结果

为了表明文中提出的分散控制方案是有效的,我们把文献[3]中的机械手作为例子,这工业机械手如图2所示,它有三个关节,一个旋转关节,两个平移关节,垂直的柱体可沿铅垂轴移动,机械手的参数(质量 m_i , 磨擦系数 C_i , 惯性矩 J_i , 杆长 l_i) 给出如表1。

表1 机械手参数

i	1	2	3
m_i (Kg)	20	10	—
l_i (m)	—	0.8	—
C_i	20(Nm ⁻¹ s)	15(Nm ⁻¹ s)	7.5(Nrod ⁻¹ s)
J_i (Kg m ²)	—	0.4	4

首先设计线性模型跟随控制器。我们选择 A_{mi} , $i=1, 2, 3$, 使它有两个共轭极点

$\lambda_{i,1,2} = -0.7 \pm 0.7j$ 选择 $Q'_i = \text{diag}\{4.0, 2.0\}$, $r_i = 0.5$, $i=1, 2, 3$. 由方程 (9), (12), (13) 求得局部线性模型跟随控制器的增益 K_{pi} , K_{ui} , K_{mi} 如表 2.

表 2 局部增益

i	1	2	3
K_{pi}	[2.80, 3.90]	[2.84, 3.60]	[2.76, 3.50]
K_{ui}	4.5	1.5	1.08
K_{mi}	[32.8, 24.1]	[12.84, 4.7]	[13.56, 11.16]

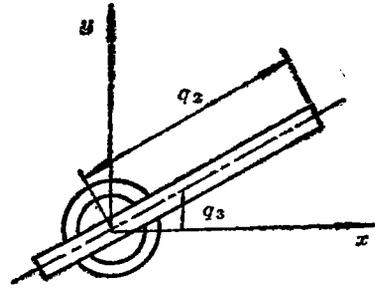


图 2 工业机械手

为了补偿非线性耦合项的影响, 设计 N 个分散自适应控制器, 其参数选择为:

$$Q_i = \text{diag}\{15, 1\} \quad i=1, 2, 3$$

解李雅普诺夫方程得:

$$P_i = \begin{bmatrix} 16.25 & 7.5 \\ 7.5 & 5.6 \end{bmatrix} \quad i=1, 2, 3$$

$$D_1 = [0.25 \quad 0.18]$$

$$D_2 = [0.75 \quad 0.56]$$

$$D_3 = [0.69 \quad 0.52]$$

自适应环中的其他参数选择为 $F_i = F'_i = M_i = M'_i = N_i = 1$, G_i 为 I_2 阵. 各子系统的期望输出轨线如图 3 所示. 我们仿真了仅用线性模型跟随控制器及同时用线性模型跟随控制器和自适应控制器的跟踪特性. 图 4、5、6 给出各子系统的跟踪误差曲线.

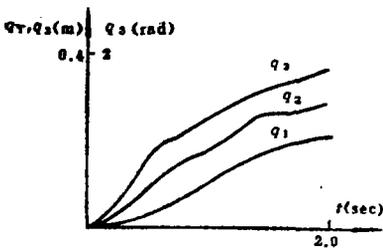


图 3 期望轨迹

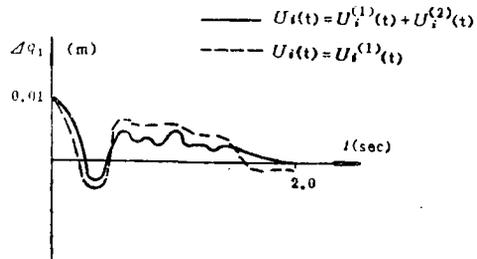


图 4 子系统 1 的跟踪误差

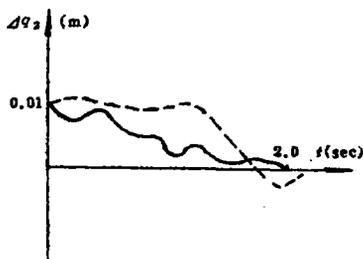


图 5 子系统 2 的跟踪误差

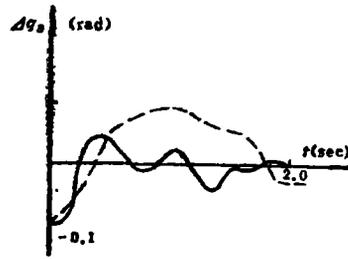


图 6 子系统 3 的跟踪误差

5. 结 论

本论文提出的机器人系统分散控制方法应用分散控制理论,将机器人系统分解为 N 个子系统,每个子系统描述了机器人系统一个自由度的动力学特性。这些子系统是2阶的,比整体系统低得多,综合出的分散控制器仅利用各自子系统的信息,而不需要其他子系统的信息,因而分散控制器比集中控制器结构简单,计算量小,易于用多微机系统实现并行控制,使得复杂的控制算法能用于实际机器人系统。我们把[3]中的工业机械手作为例子进行仿真,仿真结果表明,具有自适应环的分散控制器能很好地控制机械手的关节跟踪期望轨线。

参 考 文 献

- [1] Brady, M. Robot motion, Planning and control, MIT Press 1982
- [2] Coiffet, P. Robot technology Vol.1 modelling and control. Kogan Page, London, 1983
- [3] Freund, E. Fast nonlinear control with arbitrary pole placement industrial robots and manipulators. Int. Robotics Research Vol. 1, No. 1, 1982
- [4] Jamshidi, M. Large-Scale Systems Modelling and Control, North-Holland, 1983
- [5] Stokic, D. and M. Vukobratovic. Practical stabilization of robotic systems by decentralized control. Automatica Vol.20, No. 8, 1984
- [6] Vukobratovic, M. and D. Stokic. Suboptimal synthesis of a robust decentralized control for large-scale mechanical systems. Automatica Vol. 20, No. 6, 1984
- [7] Landau, I. D. Adaptive Control: the Model Reference Approach. Marcel Dekker, 1979
- [8] 胡晏如, 智能机器人的递阶分散控制, 中国人工智能学会第五届学术年会论文集, 北京, 1987.4

Decentralized Control of Robotic Manipulators

Hu Yanru Chang Wensen

Abstract

This paper presents a decentralized control approach to robotic manipulators. Every degree of freedom of the robotic system is served as a subsystem by using the decentralized method. First we synthesize N decentralized linear controllers from the decoupled subsystem models of the robotic system. In order to compensate for the influence of nonlinearity and coupling we introd-

uce an adaptive loop into every subsystem. The advantages of the control law proposed are, the controller is simple; calculation time is small; the decentralized control proposed is convenient to be implemented by parallel microprocessor system.

KEY WORDS Robot control, Decentralized control

国防科技大学试行在职人员申请学位制度

国防科技大学电子计算机系张民选、刘治、穆长富三名教师，一直坚持在职学习从事科研，经一九八七年全国第二次在职人员申请学位试点工作汇报验收会验收合格，获得了工学硕士学位。

张民选一九七七年毕业后留校任教，十一年来，先后参加了五个型号计算机的研制工作，获得七项科技成果奖，在有关学术刊物和会议上发表了二十一篇学术论文或科研报告。他的学位论文“YH-I计算机常用函数计算方案设计与论证”，从YH-I的研制目的出发对巨型机主要应用领域中具有代表性的大量典型应用程序作了统计分析，给出了常用函数的出现概率、调用频率和运行时间比的统计数据；讨论了常用函数的加速对系统速度提高的作用及两者之间数量关系，并从硬件和软件结合上提出了加速函数计算的可行算法和优化的硬件实现方案，同时给出了性能评价。

刘治一九六五年入伍在某基地工作期间，受到嘉奖十多次，参加了一九八四年我国第一颗通信卫星的发射、跟踪、测控，荣立二等功一次。调入电子计算机系工作后，在出色完成本职工作的同时，取得了北京电视大学电子专业全科毕业证书。他的学位论文“流水线结构的高速数字集成电路测试设备的设计”，从YH-I工程中电路测试的实际需要，研究了大规模集成电路测试设备的核心技术问题，对YH-I的研制有实用价值。

穆长富一九七五年毕业留校任教，参加了“远望1号”测量船151中心计算机的研制、5-1000计算机乘除部件的方案论证，参加了YH超级小型机从方案论证到国家鉴定的全过程工作，获得三项科技成果奖，在有关学术刊物和会议上发表了六篇学术论文或科研报告。他的学位论文“高性能的数组机复合系统”针对外设型数组机与主机之间传输速度慢的弱点，认真进行了必要性、可行性和效能分析，使数据传输速率提高近五倍，扩大了数组机的处理范围。整个论文从理论到实践，内容较丰富，具有一定的创造性。

在论文评阅和答辩中，聘请了外单位的专家参加，并严格进行保密评阅。为了对论文评价保持较好的客观性，每篇论文都聘请了5名专家进行评阅。三个答辩委员会经无记名投票，一致建议授予张民选、刘治、穆长富工学硕士学位。校学位评定委员会逐个审议了有关材料，认为这三名教师的硕士学位质量与在校应届毕业研究生授予学位的质量相当。

(胡利民供稿)