

柔性关节机操手的神经网络控制

彭济根¹ 倪元华² 乔红³

摘 要 本文在关节柔性较弱的情况下,对柔性关节机器人操作手的轨迹跟踪问题,提出了一种基于奇异摄动理论的机器人神经网络控制设计方法,在一般框架下证明了系统跟踪误差最终一致有界,并且可以通过选取增益矩阵使该误差界任意地小.该方法克服了对模型参数线性化条件的要求,无需求解回归矩阵,因而具有很强的鲁棒性和模型推广能力.数值试验表明,所提出的控制方法是可行且有效的.

关键词 奇异摄动, 机器人, 神经网络, 柔性关节
中图分类号 TP24

Neural Network Control of Flexible-joint Robot Manipulators

Peng Ji-Gen¹ Ni Yuan-Hua² Qiao Hong³

Abstract In this paper, for flexible-joint robot manipulators with weak flexibility, we propose a neural network trajectory-tracking strategy based on singular perturbation theory. Under general assumptions, we prove that the tracking error is ultimately uniformly bounded and that the corresponding ultimate bound can be sufficiently decreased by modifying the feedback gain matrix. Since the linearization assumption of the unknown parameters is removed, the regression matrix need not be computed. Therefore, the proposed method has great robustness and the ability of model generalization. The numerical simulation shows that the proposed method is feasible and efficient.

Key words Singular perturbation, robot, neural network, joint flexibility

1 引言

随着科技与工业的发展,人们对机器人操作手的控制设计要求日益提高.研究与实践表明,如果在控制设计时忽略操作手的柔性,那么机器人操作手执行高频率与高精度任务的能力将会受到很大的限制.因此,研究柔性机器人操作手系统的控制具有重要的意义.目前,柔性关节机器人操作手的控制问题已成为机器人控制系统研究中重要的研究课题之一.现有的研究主要基于反馈线性化^[1~3]、奇异摄动^[4~6]、积分流形^[1,5]等方法.

对柔性关节机操手系统来说,虽然在某些条件下,可以得到近似的反馈线性化^[1,2],但是,完全精确反馈线性化是不可能的.在[3]中,作者在简化模型的基础上给出了一个反馈线性化算法.与[1,2]一

样,此算法需要连杆加速度作为反馈变量.但在物理上要准确地测量加速度是很困难的,因此该算法在实际工程中很难实现.

基于奇异摄动理论的控制方法目前主要集中在自适应控制上^[7].在这些自适应控制方案中,一般不需要精确知道机器人的惯性参数,而是通过一定的自适应规律来辨识这些参数.为辨识这些未知参数,通常假定参数可以线性化,因而需要求解回归矩阵.实践证明,这种控制方法不具备模型推广能力^[6].在大多数情况下参数线性化假设是不成立的.

与奇异摄动理论相比,积分流形具有精确简化模型的能力^[1].然而,对于一个给定的非线性控制系统,往往难以找出其精确流形.虽然通过线性化可得到流形的近似解,但随着要求的精度增高,其控制越困难,甚至不可实现,因而仅适合于理论分析^[5].

本文的主要目的是:在一般框架下,对柔性关节机器人操作手轨迹跟踪问题给出一种基于奇异摄动理论的神经网络控制策略.这种控制方法的主要思想是,在关节柔性较弱的条件下,将关节处的柔性力和关节角分别看成快、慢变量.从而将整个柔性关节机器人操作手系统分解成快慢两个独立的子系统(即,降阶子系统与边界层子系统).然后,利用混合控制原理,分别对这两个子系统设计快慢控制器,加和后作为整个系统的输入.设计快速控制器的目的是,使得边界层子系统是指数稳定的,即在快时间尺度下在关节处提供充分的阻尼.边界层消退后,得

收稿日期 2005-9-21 收修改稿日期 2006-8-29
Received September 21, 2005; in revised form August 29, 2006
国家自然科学基金(10371097)资助
Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China (10371097)

1. 西安交通大学理学院信息与系统科学研究所, 西安 710049 2. 曲阜师范大学数学科学学院, 山东曲阜 273165 3. 中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学重点实验室, 北京 100080

1. Institute for Information and System Sciences, Faculty of Science, Xi'an Jiatong University, Xi'an 710049 2. School of Mathematical Science, Qufu Normal University, Qufu 273165 3. Key Laboratory of Complex System and Intelligence Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

DOI: 10.1360/aas-007-0175

到的降阶子系统与通常的刚性机械人操作手系统是相同的. 这样, 对降阶子系统设计神经网络慢速控制, 以达到对原系统轨迹跟踪控制的目的. 稳定性分析和数值仿真表明所提控制策略是可行和有效的.

2 柔性关节机器人操作手系统模型

考虑柔性关节机器人操作手系统的动力学模型^[3]

$$D(\mathbf{q}_1)\ddot{\mathbf{q}}_1 + C(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1)\dot{\mathbf{q}}_1 + G(\mathbf{q}_1) + F(\dot{\mathbf{q}}_1) = K(\mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_1) \quad (1)$$

$$J\ddot{\mathbf{q}}_2 - K(\mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_1) = \mathbf{u} \quad (2)$$

其中 $\mathbf{q}_1 \in R^n$ 与 $\mathbf{q}_2 \in R^n$ 分别表示连杆和转子的转角; $D(\mathbf{q}_1)$ 与 J 分别表示连杆和转子的惯性矩阵; $C(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1)\dot{\mathbf{q}}_1$ 、 $G(\mathbf{q}_1)$ 、 $F(\dot{\mathbf{q}}_1)$ 分别表示哥氏力和离心力项、重力项、摩擦力项; K 为关节角刚度系数; $\mathbf{u} \in R^n$ 为控制输入.

根据物理意义, 模型中各变量具有几个重要的基本性质, 在此不再赘述, 读者可参考 [8] 或其它相关文献.

注 1. 矩阵 $D(\mathbf{q}_1)$ 和向量 $G(\mathbf{q}_1)$ 的每一个元素都是由连杆质量 m 、连杆长度 a 和关节角正余弦组成的有限维多项式; 哥氏力和离心力项可选取为 $C(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1) = \dot{D}(\mathbf{q}_1)\dot{\mathbf{q}}_1 - \frac{1}{2}\dot{\mathbf{q}}_d^T \frac{\partial D}{\partial \mathbf{q}_1} \dot{\mathbf{q}}_1$.

在实际工程应用中, 关节的柔性通常是很小的, 即 K 非常大, 因而存在正常数 $\epsilon \ll 1$ 使得 $K = \epsilon^{-2}K_1$, 其中 K_1 是与 ϵ 无关的正对角阵. 令 $\mathbf{z} = K(\mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_1)$, 则系统 (1-2) 等价与如下系统

$$D(\mathbf{q}_1)\ddot{\mathbf{q}}_1 + C(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1)\dot{\mathbf{q}}_1 + G(\mathbf{q}_1) + F(\dot{\mathbf{q}}_1) = \mathbf{z} \quad (3)$$

$$\epsilon^2 J\ddot{\mathbf{z}} + K_1\mathbf{z} = K_1(\mathbf{u} - J\ddot{\mathbf{q}}_1) \quad (4)$$

易见, 当关节柔性较弱 (即, 当 ϵ 足够小) 时, 系统 (4-5) 可以看成是一个奇异摄动系统. 根据奇异摄动系统理论^[9], 系统 (4-5) 可以近似地分解成两个独立的子系统, 即降阶系统与边界层系统. 如果将控制变量 \mathbf{u} 分解成独立的两个部分, 那么, 这两个部分将分别出现于降阶系统和边界层系统中. 这样, 我们可通过分别对降阶系统和边界层系统设计适当的控制器, 达到对系统 (4-5) 从而对 (1-2) 的控制目的. 这就是混和控制方法 (Composite control method)^[9] 的思想.

设 $\mathbf{u} = \mathbf{u}_s + \mathbf{u}_f$, 其中 \mathbf{u}_s 和 \mathbf{u}_f 分别称为控制变量的慢部和快部. 特别地, 若控制变量的快部 \mathbf{u}_f 设计为: $\mathbf{u}_f = \epsilon^{-1}K_2(\dot{\mathbf{q}}_1 - \dot{\mathbf{q}}_2)$, 其中 K_2 是与 ϵ 无关

的正对角阵, 则 (4) 等价于

$$\epsilon^2 J\ddot{\mathbf{z}} + \epsilon K_2\dot{\mathbf{z}} + K_1\mathbf{z} = K_1(\mathbf{u}_s - J\ddot{\mathbf{q}}_1) \quad (5)$$

进一步地, 若令 $\mathbf{w} = (\mathbf{z}^T, \epsilon\dot{\mathbf{z}}^T)^T$, 那么, 容易验证, 方程 (5) 因而 (4) 等价于

$$\epsilon\dot{\mathbf{w}} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -J^{-1}K_1(I + JD^{-1}) & -J^{-1}K_2 \end{bmatrix} \mathbf{w} + \begin{bmatrix} 0 \\ J^{-1}K_1JD^{-1}(C\dot{\mathbf{q}}_1 + G + F) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ J^{-1}K_1 \end{bmatrix} \mathbf{u}_s \triangleq A(\mathbf{q}_1)\mathbf{w} + B(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1) + E\mathbf{u}_s \quad (6)$$

易见, 矩阵 $A(\mathbf{q}_1)$ 是可逆的. 于是, 求 (3) 和 (6) 在 $\epsilon = 0$ 时的解, 则有

$$D(\bar{\mathbf{q}}_1)\ddot{\bar{\mathbf{q}}}_1 + C(\bar{\mathbf{q}}_1, \dot{\bar{\mathbf{q}}}_1)\dot{\bar{\mathbf{q}}}_1 + G(\bar{\mathbf{q}}_1) + F(\dot{\bar{\mathbf{q}}}_1) = [I \ 0]\bar{\mathbf{w}} \quad (7)$$

$$\bar{\mathbf{w}} = -A(\bar{\mathbf{q}}(t))^{-1}[B(\bar{\mathbf{q}}_1, \dot{\bar{\mathbf{q}}}_1) + E\mathbf{u}_s] \quad (8)$$

该系统 (7-8) 称为系统 (3-4) 的降阶系统. 若令

$$\mathbf{w}_1 = -A(\mathbf{q}(t))^{-1}[B(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1) + E\mathbf{u}_s]$$

由 [5] 第 (40) 式知

$$\mathbf{w}_1 = \begin{bmatrix} (I + JD^{-1})^{-1}Q + (I + JD^{-1})^{-1}\mathbf{u}_s \\ 0 \end{bmatrix}$$

其中 $Q = JD^{-1}(C\dot{\mathbf{q}}_1 + G + F)$, 进而令 $\boldsymbol{\eta} = \mathbf{w} - \mathbf{w}_1$, $\tau = \epsilon^{-1}t$, 则 (3) 和 (6) 等价于

$$D(\mathbf{q}_1)\ddot{\mathbf{q}}_1 + C(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1)\dot{\mathbf{q}}_1 + G(\mathbf{q}_1) + F(\dot{\mathbf{q}}_1) = (I + JD^{-1})^{-1}\mathbf{u}_s + [I \ 0]\boldsymbol{\eta} + P \quad (9)$$

$$\frac{d\boldsymbol{\eta}}{d\tau} = A(\mathbf{q}_1(t))\boldsymbol{\eta} - \epsilon\dot{\mathbf{w}}_1 \quad (10)$$

其中 $P = (I + JD^{-1})^{-1}JD^{-1}(C\dot{\mathbf{q}}_1 + G + F)$. 在 (10) 中令 $\epsilon = 0$, 则得到系统 (3-4) 的边界层系统为

$$\frac{d\bar{\boldsymbol{\eta}}}{d\tau} = A(\bar{\mathbf{q}}_1(t))\bar{\boldsymbol{\eta}} \quad (11)$$

为了利于控制系统的设计, 我们引入以下变量

$$\mathbf{r} = \dot{\mathbf{e}} + \Lambda\mathbf{e}, \mathbf{e} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q}_1 \quad (12)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{y}) = D(\mathbf{q}_1)(\ddot{\mathbf{q}}_d + \Lambda\dot{\mathbf{e}}) + C(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1)(\dot{\mathbf{q}}_d + \Lambda\mathbf{e}) + G(\mathbf{q}_1) + F(\mathbf{q}_1) - P \quad (13)$$

其中, \mathbf{q}_d 为给定的连杆期望轨迹, Λ 为正定对角阵, \mathbf{y} 为适当选取的变量 (譬如, $\mathbf{y} =$

$(\dot{q}_d^T, \ddot{q}_d^T, \ddot{q}_d^T, \mathbf{e}^T, \mathbf{r}^T)^T$ 。则方程 (9) 可等价地写成

$$D(\mathbf{q}_1)\dot{\mathbf{r}} = -C(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1)\mathbf{r} + f(\mathbf{y}) - [I \ 0]\boldsymbol{\eta} - (I + JD^{-1})^{-1}\mathbf{u}_s \quad (14)$$

同样地，令 $\bar{\mathbf{r}} = \dot{\bar{\mathbf{e}}} + \Lambda\bar{\mathbf{e}}, \bar{\mathbf{e}} = \mathbf{q}_d - \bar{\mathbf{q}}_1$ ，则降阶系统 (7-8) 等价于

$$D(\bar{\mathbf{q}}_1)\dot{\bar{\mathbf{r}}} = -C(\bar{\mathbf{q}}_1, \dot{\bar{\mathbf{q}}}_1)\bar{\mathbf{r}} + f(\bar{\mathbf{y}}) - (I + JD^{-1})^{-1}\mathbf{u}_s \quad (15)$$

注 2. 在 (12) 式中，变量 \mathbf{e} 通常称为追踪误差， \mathbf{r} 称为滤波误差。容易证明， \mathbf{e} 可以由 \mathbf{r} 上界控制^[8]。期望轨迹 \mathbf{q}_d 一般可选择为三阶光滑且有界的曲线，即，存在常数 $q_B > 0$ ，使得

$$\|(\dot{q}_d^T, \ddot{q}_d^T, \ddot{q}_d^T)^T\| \leq q_B, \forall t \geq 0 \quad (16)$$

3 基于奇异摄动理论的神经网络控制

本节在函数 $f(\mathbf{y})$ 未知的情况下，运用神经网络的万有逼近性质，为系统 (1-2) 建立一种神经网络控制方法。

由神经网络的万有逼近性质^[8] 知， $f(\mathbf{y})$ 可以由一个单层的 Functional-link 神经网络任意逼近，即，对任意给定的紧集 $S \in R^n$ 和逼近误差界 ϵ_N ，可适当选取激活函数 $\phi(x)$ 和权重矩阵 W_0 使得

$$f(\mathbf{y}) = W_0^T \phi(\mathbf{y}) + \epsilon(\mathbf{y}), \forall \mathbf{y} \in S \quad (17)$$

其中 $\|\epsilon(\mathbf{y})\| \leq \epsilon_N$ ，通常地， $\phi(x)$ 可选取为^[8]

$$\left(\left[\frac{1}{1 + \exp(-\cdot)}, \dots, \frac{1}{1 + \exp(-\cdot)} \right]^T \right)_{5n \times 1} \quad (18)$$

值得注意的是，因为函数 $f(\mathbf{y})$ 是未知的，所以满足 (17) 式的权重矩阵 W_0 是未知的。然而若激活函数选定，则 W_0 的变化范围是可以确定的，既存在正常数 ω_B ，使得 $\|W_0\|_F \leq \omega_B$ ，其中 $\|W_0\|_F = \sqrt{\text{tr}\{W_0^T W_0\}}$ 为 W_0 的 Frobenius 范数。

由 (10) 和 (14) 知，在网络逼近 (17) 时，系统 (1-2) 在紧集 S 上等价于

$$D\dot{\mathbf{r}} = -C\mathbf{r} + W_0^T \phi(\mathbf{y}) + \epsilon(\mathbf{y}) - [I \ 0]\boldsymbol{\eta} - (I + JD^{-1})^{-1}\mathbf{u}_s \quad (19)$$

$$\frac{d\boldsymbol{\eta}}{d\tau} = A(q_1)\boldsymbol{\eta} - \epsilon\dot{\mathbf{w}}_1 \quad (20)$$

为得到系统跟踪误差的最终一致有界性结论，下面给出两个引理。

引理 1.^[9] 设 $A(t) \in R^{n \times n}$ 为以 t 为变量的矩阵函数，如果 $A(t)$ 满足以下条件 (a) - (c)：

a) 特征值的实部严格小于零，即存在常数 $c_1 > 0$ ，使 $\text{Re}\lambda \leq -c_1, \forall t$ ；

b) $A(t)$ 一致有界，即存在常数 $c_2 > 0$ ，使 $\|A(t)\| \leq c_2, \forall t$ ；

c) $\dot{A}(t)$ 一致有界，即存在常数 $\beta > 0$ ，使 $\|A(t)\| \leq \beta, \forall t$ 。

那么，存在常数 $\alpha_1 > 0$ ，使得以下结论成立：

1) 存在 $P(t), \forall t, P(t)A(t) + A^T(t)P(t) = -I$ ；
 2) $\forall \mathbf{x} \in R^n, t$ ，有 $C^{-1}\mathbf{x}^T \mathbf{x} \leq 2\mathbf{x}^T P(t)\mathbf{x} \leq \alpha_1^{-1}C^2\mathbf{x}^T \mathbf{x}$ ，其中 $C = \sup_t \|A(t)\|$ ；

3) $\forall t$ ，有 $\|\dot{P}\| \leq 2^{-1}\alpha_1^{-1}\beta M^4$ ，其中 $P(t) = \int_0^\infty [e^{A(t)\tau}]^T [e^{A(t)\tau}] d\tau$ 为正定对称矩阵。

注 3. 容易验证^[5]，若在 (5) 式中选择 $K_2 = K_1 J$ ，则 $A(t) := A(q_1(t))$ 满足引理 1 中的三个条件，其中 $A(q_1(t))$ 为方程 (6) 给出，因而引理 1 的三个结论都成立，其中

$$P(t) = \int_0^\infty [e^{A(q_1(t))\tau}]^T [e^{A(q_1(t))\tau}] d\tau \quad (21)$$

为方便计，相应于引理 1 中结论 3)，令

$$\tau_1 := 2^{-1}\alpha_1^{-1}\beta M^4$$

若慢速控制 \mathbf{u}_s 设计为

$$\mathbf{u}_s = (I + JD^{-1})[\widehat{W}^T \phi(\mathbf{y}) + K_r \mathbf{r}]$$

其中 \widehat{W} 是对 W_0 的估计，则系统 (19) 等价于

$$D(\mathbf{q}_1)\dot{\mathbf{r}} = -[C(\mathbf{T}_1, \dot{\mathbf{T}}_1) + K_r]\mathbf{r} + \widehat{W}^T \phi(\mathbf{y}) + \epsilon(\mathbf{y}) - [I \ 0]\boldsymbol{\eta} \quad (22)$$

其中 $\widetilde{W} = W_0 - \widehat{W}$ 。

引理 2. 令 $\mathbf{x} = [x^T \ \mathbf{r}^T]^T, X = [x^T \ \boldsymbol{\eta}^T]^T$ ，若 $(X, \widetilde{W}) \in B_X \times B_{\widetilde{W}} \triangleq B$ ，其中 B_X 和 $B_{\widetilde{W}}$ 分别表示中心在原点半径为 ρ_X 和 $\rho_{\widetilde{W}}$ 的闭球。若 w_1 可微，则存在正常数 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 使下面不等式成立

$$\|\dot{\mathbf{w}}_1\| \leq \beta_1 + \beta_2 \|\mathbf{x}\| + \beta_3 \|\boldsymbol{\eta}\| \quad (23)$$

证明： w_1 沿着整个系统的解轨迹和神经网络权重调节法则 $\widehat{W} = F\phi(\mathbf{y})\mathbf{r}(t)^T - \kappa F\|\mathbf{r}(t)\|\widehat{W}(t)$ 求得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{w}}_1 &= \frac{\partial w_1}{\partial q_d} \dot{q}_d + \frac{\partial w_1}{\partial \dot{q}_d} \ddot{q}_d + \frac{\partial w_1}{\partial \ddot{q}_d} \ddot{\ddot{q}}_d + \frac{\partial w_1}{\partial \mathbf{e}} \dot{\mathbf{e}} \\ &\quad + \frac{\partial w_1}{\partial \mathbf{r}} \dot{\mathbf{r}} + \sum_{i,j} \frac{\partial w_1}{\partial \widetilde{W}_{ij}} \dot{\widetilde{W}}_{ij} \\ &= \frac{\partial w_1}{\partial q_d} \dot{q}_d + \frac{\partial w_1}{\partial \dot{q}_d} \ddot{q}_d + \frac{\partial w_1}{\partial \ddot{q}_d} \ddot{\ddot{q}}_d + \frac{\partial w_1}{\partial \mathbf{e}} (\mathbf{r} - \Lambda \mathbf{e}) \\ &\quad + \sum_{i,j} \frac{\partial w_1}{\partial \widetilde{W}_{ij}} \dot{\widetilde{W}}_{ij} + \frac{\partial w_1}{\partial \mathbf{r}} D^{-1}[-(C + K_r)\mathbf{r} \\ &\quad + \widehat{W}^T \phi(\mathbf{y}) + \epsilon(\mathbf{y}) - [I \ 0]\boldsymbol{\eta}] \end{aligned} \quad (24)$$

其中 $\widetilde{W}_{ij}, \dot{\widetilde{W}}_{ij}$ 分别是矩阵 $\widetilde{W}, \dot{\widetilde{W}}$ 的第 i 行第 j 列元.

若定义 $M = \sup\{\|\frac{\partial w_1}{\partial \widetilde{W}_{ij}}\| : (X, \widetilde{W}) \in B_X \times B_{\widetilde{W}}\}$, 则

$$\begin{aligned} \|\sum_{i,j} \frac{\partial w_1}{\partial \widetilde{W}_{ij}} \dot{\widetilde{W}}_{ij}\| &\leq \sum_{i,j} |\dot{\widetilde{W}}_{ij}| \cdot \|\frac{\partial w_1}{\partial \widetilde{W}_{ij}}\| \\ &\leq M \sum_{i,j} |\dot{\widetilde{W}}_{ij}| = M \|\dot{\widetilde{W}}\|_1 \end{aligned}$$

其中 $\|\cdot\|_1$ 为矩阵的 1-范数. 由范数的等价性可得, 存在 $c > 0$, 使得 $\|\dot{\widetilde{W}}\|_1 \leq c \|\dot{\widetilde{W}}\|_F$, 所以

$$\begin{aligned} \|\sum_{i,j} \frac{\partial w_1}{\partial \widetilde{W}_{ij}} \dot{\widetilde{W}}_{ij}\| &\leq cM \|\dot{\widetilde{W}}\|_F \\ &\leq cM \|\mathbf{r}\| (\|F\phi\| + \kappa \|F\|_F (\omega_B + \|\widetilde{W}\|_F)) \end{aligned}$$

由注 1 知, $\frac{\partial w_1}{\partial q_d}, \frac{\partial w_1}{\partial \dot{q}_d}, \frac{\partial w_1}{\partial e}, \frac{\partial w_1}{\partial \mathbf{r}}, \frac{\partial w_1}{\partial \widetilde{W}}$ 都是 $(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, e, \mathbf{r}, \widetilde{W})$ 的连续可微函数. 因为 $(q_d^T, \dot{q}_d^T, \ddot{q}_d^T, e^T, \mathbf{r}^T, \widetilde{W}^T)^T$ 一致有界, 所以当 $(X, \widetilde{W}) \in B_X \times B_{\widetilde{W}}$ 时, 存在正常数 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 使得

$$\begin{aligned} \beta_1 &\geq \|\frac{\partial w_1}{\partial q_d} \dot{q}_d + \frac{\partial w_1}{\partial \dot{q}_d} \ddot{q}_d + \frac{\partial w_1}{\partial e} \dot{e}\| \\ &\quad + \|\frac{\partial w_1}{\partial \mathbf{r}} D^{-1} [\widetilde{W}^T \phi + \epsilon]\| \\ \beta_2 \|\mathbf{x}\| &\geq \|\frac{\partial w_1}{\partial e} (\mathbf{r} - \Lambda e) + \frac{\partial w_1}{\partial \mathbf{r}} D^{-1} [-(C + K_r) \mathbf{r}]\| \\ &\quad + \|\sum_{i,j} \frac{\partial w_1}{\partial \widetilde{W}_{ij}} \dot{\widetilde{W}}_{ij}\| \\ \beta_3 \|\boldsymbol{\eta}\| &\geq \|\frac{\partial w_1}{\partial \mathbf{r}} D^{-1} [I \ 0] \boldsymbol{\eta}\| \end{aligned}$$

于是, 由 (24) 式知, 不等式 (23) 成立, 证毕. \square

注 4. w_1 的可微性不难满足. 事实上, 由 [8] 知, 一般情况下摩擦力项 $F(\dot{q}_1)$ 可以近似地表示为 $F\dot{q}_1$. 因此, 适当地选择径向基函数 $\phi(\cdot)$ 可使 w_1 是 $(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, e, \mathbf{r}, \widetilde{W})$ 的连续可微函数.

定理 1. 如果控制输入 $\mathbf{u} = \mathbf{u}_s + \mathbf{u}_f$ 设计为

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_s &= (I + JD^{-1}) [\widetilde{W}^T \phi(\mathbf{y}) + K_r \mathbf{r}], \mathbf{u}_f = \\ &\quad \epsilon^{-1} K_1 J (\dot{q}_1 - \dot{q}_2) \end{aligned} \quad (25)$$

而且, 神经网络权重按如下规则学习

$$\dot{\widetilde{W}} = F\phi(\mathbf{y})\mathbf{r}(t)^T - \kappa F \|\mathbf{r}(t)\| \widetilde{W}(t) \quad (26)$$

其中, K_r 和 F 为正定对角矩阵, κ 为调节参数, 那么, 柔性关节机器人系统 (1-2) 的滤波误差 \mathbf{r} (因而跟踪误差 e) 和神经网络权重矩阵 \widetilde{W} 是一致最终有

界的, 而且, r 的最终界可以通过调节增益矩阵 K_r 和参数 κ 变得任意小.

证明. 设 $P(t)$ 如 (21) 所示, 分别对降阶系统和边界层系统设计李雅普诺夫函数

$$\begin{aligned} V_1(\mathbf{r}, \widetilde{W}) &= \frac{1}{2} \mathbf{r}^T D \mathbf{r} + \frac{1}{2} \text{tr}\{\widetilde{W}^T F^{-1} \widetilde{W}\}, V_2(\boldsymbol{\eta}) \\ &= \boldsymbol{\eta}^T P \boldsymbol{\eta} \end{aligned} \quad (27)$$

易得 V_1 和 V_2 沿着原系统 (1-2) 等价地沿着系统 (20-22) 解轨迹的求导满足

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq -\lambda_{\min}\{K_r\} \|\mathbf{r}\|^2 + \kappa \|\mathbf{r}\| \cdot \|\widetilde{W}\|_F (\omega_B \\ &\quad - \|\widetilde{W}\|_F) + \epsilon_N \|\mathbf{r}\| + \|\mathbf{r}\| \cdot \|\boldsymbol{\eta}\| \end{aligned} \quad (28)$$

$$\dot{V}_2 = (-\epsilon^{-1} + \tau_1) \|\boldsymbol{\eta}\|^2 - 2\boldsymbol{\eta}^T P(t) \dot{\mathbf{w}}_1 \quad (29)$$

令 $V = (1-d)V_1 + dV_2$, 其中 $d \in (0, 1)$ 为可调参数. 由引理 2 知, 当 $(X, \widetilde{W}) \in B_X \times B_{\widetilde{W}}$ 时, 由 (28)(29) 得

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\left[\|\mathbf{x}\| \quad \|\boldsymbol{\eta}\| \right] Q \begin{bmatrix} \|\mathbf{x}\| \\ \|\boldsymbol{\eta}\| \end{bmatrix} + d\tau_2 \beta_1 \|\boldsymbol{\eta}\| + \\ &\quad (1-d) [\kappa \|\mathbf{r}\| \cdot \|\widetilde{W}\|_F (\omega_B - \|\widetilde{W}\|_F) + \epsilon_N \|\mathbf{r}\|] \end{aligned}$$

其中, Q 为矩阵

$$\begin{bmatrix} (1-d)\lambda_{\min}\{K_r\} & -\frac{1}{2}[(1-d) + d\tau_2\beta_2] \\ -\frac{1}{2}[(1-d) + d\tau_2\beta_2] & d(\epsilon^{-1} - \tau_1 - \tau_2\beta_3) \end{bmatrix}$$

τ_2 是引理 1 结论 (2) 中的 $\alpha_1^{-1} C^2$. 易知, 当

$$\epsilon \leq \frac{4d(1-d)\lambda_{\min}\{K_r\}}{[(1-d) + d\tau_2\beta_2]^2 + \Delta} =: \epsilon_1 \quad (30)$$

时 (其中 $\Delta = 4d(1-d)\lambda_{\min}\{K_r\}(\tau_1 + \tau_2\beta_3)$), Q 为正定矩阵. 由 $\|\mathbf{x}\| \leq \|X\|, \|\boldsymbol{\eta}\| \leq \|X\|$ 得

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\lambda_{\min}\{Q\} \|X\|^2 + d\tau_2 \beta_1 \|X\| + (1-d) \cdot \\ &\quad [\kappa \|X\| \cdot \|\widetilde{W}\|_F (\omega_B - \|\widetilde{W}\|_F) + \epsilon_N \|X\|] \\ &= -\|X\| \{\lambda_{\min}\{Q\} \|X\| + (1-d) [\kappa \|\widetilde{W}\|_F \\ &\quad (\|\widetilde{W}\|_F - \omega_B) - \epsilon_N] - d\tau_2 \beta_1\} \end{aligned} \quad (31)$$

从而, 当

$$\|X\| > \frac{(1-d) [\kappa \frac{\omega_B^2}{4} + \epsilon_N] + d\tau_2 \beta_1}{\lambda_{\min}\{Q\}} \triangleq l_1 \quad (32)$$

或

$$\|\widetilde{W}\|_F > \frac{\omega_B}{2} + \sqrt{\frac{\omega_B^2}{4} + \frac{(1-d)\epsilon_N + d\tau_2\beta_1}{(1-d)\kappa}} \triangleq l_2 \quad (33)$$

时, $\dot{V} < 0$. 为求矩阵 Q 的最小特征值, 令

$$\begin{aligned} \delta_1 &= (1-d)\lambda_{\min}\{K_r\}[d(\epsilon^{-1} - \tau_1 - \tau_2\beta_3)] \\ &\quad - \frac{1}{4}[(1-d) + d\tau_2\beta_2]^2 \\ \delta_2 &= (1-d)\lambda_{\min}\{K_r\} + d(\epsilon^{-1} - \tau_1 - \tau_2\beta_3) \end{aligned}$$

易得 Q 的最小特征值 $Q_{\min} = \frac{\delta_2 - \sqrt{\delta_2^2 - 4\delta_1}}{2}$. 从而有 $\lim_{\epsilon \rightarrow 0} Q_{\min} = (1-d)\lambda_{\min}\{K_r\}$. 于是

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} l_1 = \frac{(1-d)[\kappa\frac{\omega_B^2}{4} + \epsilon_N] + d\tau_2\beta_1}{(1-d)\lambda_{\min}\{K_r\}} \quad (34)$$

记 $\mathcal{R}_a = \{(X, \tilde{W}) : (X, \tilde{W}) \in B, V(X, \tilde{W}) \leq c_a\}$, 其中 c_a 为使得 $\mathcal{R}_a \subset B$ 的最大的正数; $\mathcal{S} = \{(X, \tilde{W}) : (X, \tilde{W}) \in B, V(X, \tilde{W}) \leq c, \dot{V} > 0\}$, 其中 c 为使得 $\mathcal{S} \subset B$ 的最大的正数. 易见 $\mathcal{S} \subset \mathcal{R}_a$.

设初始误差 $(X(0), \tilde{W}(0)) \in \mathcal{R}_a$. 若 $(X(0), \tilde{W}(0)) \in \mathcal{R}_a \setminus \mathcal{S}$, 则有 $\dot{V} < 0$, 因而随着时间的推移 V 会逐渐变小直至 (X, \tilde{W}) 进入 \mathcal{S} , 而一旦进入 \mathcal{S} , 就有 $\dot{V} > 0$, 此时 V 会变大, 因此 (X, \tilde{W}) 将渐近收敛到 \mathcal{S} 的边界. 若 $(X(0), \tilde{W}(0)) \in \mathcal{S}$, 也可得到相同的结论.

现令 $\mathcal{T} = \{(X, \tilde{W}) : \|X\| \leq l_1, \|\tilde{W}\| \leq l_2\}$, 由 (30-34) 知, 当 $\rho_{\tilde{W}} > 2\omega_B$ 时, 可以适当选取 K_r, κ, d 和 $\epsilon^* < \epsilon_1$ 使得对任意的 $\epsilon < \epsilon^*$, 有 $l_1 < \rho_X, l_2 < \rho_{\tilde{W}}$, 从而 $\mathcal{T} \subset B$, 因而必有 $\mathcal{S} \subset \mathcal{T}$. 否则 \mathcal{S} 中必存在一点 $(X^*, \tilde{W}^*) \notin \mathcal{T}$, 即 $\|X\| \geq l_1$ 或 $\|\tilde{W}\| \geq l_2$, 从而 $\dot{V}(X^*, \tilde{W}^*) < 0$, 此与 \mathcal{S} 的定义矛盾.

上面得到, 只要初始误差 $(X(0), \tilde{W}(0)) \in \mathcal{R}_a$, (X, \tilde{W}) 就将渐近收敛到 \mathcal{S} 的边界. 而 $\mathcal{S} \subset \mathcal{T}$, 故充分长时间后, $\|X\| \leq l_1, \|\tilde{W}\| \leq l_2$ 成立, 从而 $X(t)$ (因而滤波误差 $r(t)$) 和 $\tilde{W}(t)$ 是最终一致界的. 而 $r(t)$ 的最终界 l_1 可以通过调节增益矩阵 K_r 和参数 κ 变得任意小. \square

注 5. 注意到, 神经网络输入涉及到 $y = (\mathbf{q}_d^T, \dot{\mathbf{q}}_d^T, \ddot{\mathbf{q}}_d^T, \mathbf{e}^T, \mathbf{r}^T)^T$ 中的 5 个输入参数. 为减少神经网络输入参数, 文 [10] 给出了一大类机器人控制算法, 其中一个技巧就是“用期望轨迹代替实际轨迹作为控制输入”. 在 [11] 中, 作者对于神经网络控制提出了一个新的控制算法, 其网络输入为 $y = (\mathbf{q}_d^T, \dot{\mathbf{q}}_d^T, \ddot{\mathbf{q}}_d^T)^T$.

4 数值仿真

为了验证所设计控制算法的有效性, 本节给出一个单连杆柔性关节机械手的数值仿真. 该机械手的动力学模型和参数取值参看文献 [12].

设期望轨迹为 $q_d = 0.1 \sin(\pi t)$, 小参数 ϵ 选取

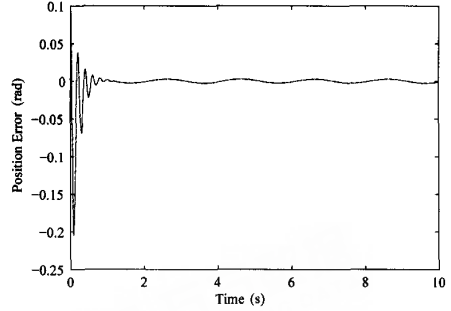


图 1 当初值 $(q_1(0), \dot{q}_1(0), q_2(0), \dot{q}_2(0)) = (0.1, 0, 0, 0)$ 时的误差曲线

Fig. 1 The error curve initiated from $(q_1(0), \dot{q}_1(0), q_2(0), \dot{q}_2(0)) = (0.1, 0, 0, 0)$

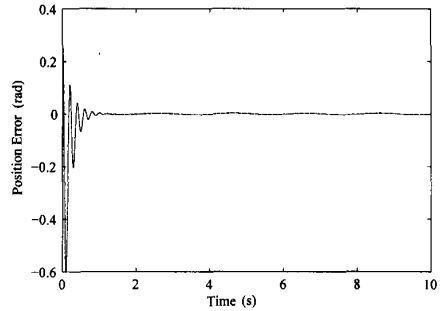


图 2 当初值为 $(q_1(0), \dot{q}_1(0), q_2(0), \dot{q}_2(0)) = (30, 3, 3, 3)$ 时的误差曲线

Fig. 2 The error curve initiated from $(q_1(0), \dot{q}_1(0), q_2(0), \dot{q}_2(0)) = (30, 3, 3, 3)$

为 $\epsilon = 0.1$, 神经网络输入选取为 $y = (\mathbf{q}_d^T, \dot{\mathbf{q}}_d^T, \ddot{\mathbf{q}}_d^T, \mathbf{e}^T, \mathbf{r}^T)^T$, 输入层神经元数为 5, 输出层神经元数为 1, 网络权重初始化为零, 且调节法则中的学习参数 $F = 5, \kappa = 1, \Lambda = 5$. 选取反馈增益矩阵 $K_r = 100$. 对不同的初值我们图1和图2所示的数值模拟结果:

从以上两图可以看出, 本文所提算法对初始误差并不敏感, 即使初始误差非常的大 (见图 2), 轨迹跟踪误差也会快速地靠近 0. 因而, 本文提出的基于奇异摄动理论的神经网络控制算法能够有效地克服参数未知、模型未知等不确定因素, 使得跟踪误差可以任意地小, 因而它是可行的且有效的.

References

- 1 Spong M W, Khorasani K, Kokotovic P V. An integral manifold approach to the feedback control of flexible joint robots. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, 3(4): 291~300.
- 2 Khonasani K, Kokotovic P V. Feedback linearization of a flexible manipulator near its rigid bod-manifold. *Systems & Control Letters*, 1985, 6(2): 187~192.

- 3 Spong M W. Modeling and control of elastic joint manipulators. *Transaction of ASME: Journal of Dynamical Systems Measurement Control*, 1987, **109**(4): 310~319.
- 4 Taghirad H D, Khosravi M A. Stability analysis and robust composite controller synthesis for flexible joint robots. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2002, **3**: 2073~2078
- 5 Ghorbel F, Spong M W. Integral manifold of singularly perturbed systems with application to rigid-link flexible-joint multibody systems. *International Journal of Nonlinear Mechanics*, 2000, **35**(1): 133~155.
- 6 Chang Y Z, Daniel R W. On the adaptive control of flexible joint robot. *Automatica*, 1992, **28**(5): 969~974
- 7 Brogliato B, Ortega R, Lozano R. Global tracking controllers for flexible joint manipulators: a comparative study. *Automatica*, 1995, **31**(7): 941~956.
- 8 Lewis F L, Yesildirak A, Jagannathan S. *Neural Network Control of Robot Manipulators and Nonlinear Systems*, New York: Taylor, 1999.
- 9 Kokotovic P V, Khalil H K, O'Reilly J. *Singular Perturbation Methods in Control: Analysis and Design*. New York: Academic press, 1986.
- 10 Bayard D S, Wen J T. New class of control laws for robotic manipulators. *International Journal of Control*, 1988, **47**(5): 1387~1406.
- 11 Sun F, Sun Z Q, Woo P. Neural network-based adaptive control design of robotic manipulators with an observer. *IEEE Transactions on Neural Network*, 2001, **12**(1): 54~67.
- 12 Spong W. Adaptive control of flexible joint manipulators: comments on two papers. *Automatica*, 1995, **31**(4): 585~590.

interests include nonlinear functional analysis, machine learning, and control theory and its applications. Corresponding author of this paper.)



倪元华 山东曲阜师范大学数学科学学院讲师。2004 年获得西安交通大学应用数学硕士学位, 研究方向为机器人学、随机 H^∞ 控制理论。E-mail: yhni78@yahoo.com.cn

(Ni Yuan-Hua Lecturer in School of Mathematical Sciences at Qufu Normal University, Qufu, Shandong. He received his master degree from Xi'an Jiaotong University in 2004. His research interests include robotics and stochastic H^∞ control theory.)



乔红 中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学重点实验室研究员。研究领域为智能机器人、模式识别、机器学习、数据挖掘。E-mail: hong.qiao@mail.ia.ac.cn

(Qiao Hong Professor in Key Lab of Complex Systems and Intelligent Science at Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. Her research interests include intelligent robots, pattern recognition, and machine learning and data mining.)



彭济根 西安交通大学理学院信息与系统科学研究所教授。研究方向为非线性泛函分析、机器学习、控制理论及应用。本文通信作者。

E-mail: jgpeng@mail.xjtu.edu.cn

(Peng Ji-Gen Professor in Institute of Information and System Science, Xi'an Jiaotong University. His research

柔性关节机械手的神经网络控制

作者: [彭济根](#), [倪元华](#), [乔红](#), [Peng Ji-Gen](#), [Ni Yuan-Hua](#), [Qiao Hong](#)
 作者单位: [彭济根, Peng Ji-Gen\(西安交通大学理学院信息与系统科学研究所, 西安, 710049\)](#), [倪元华, Ni Yuan-Hua\(曲阜师范大学数学科学学院, 山东曲阜, 273165\)](#), [乔红, Qiao Hong\(中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学重点实验室, 北京, 100080\)](#)
 刊名: [自动化学报](#) ISTIC EI PKU
 英文刊名: [ACTA AUTOMATICA SINICA](#)
 年, 卷(期): 2007, 33(2)
 被引用次数: 3次

参考文献(12条)

1. [Spong M W, Khorasani K, Kokotovic P V](#) [An integral manifold approach to the feedback control of flexible joint robots](#) 1987(04)
2. [Khorasani K, Kokotovic P V](#) [Feedback linearization of a flexible manipulator near its rigid body manifold](#) 1985(02)
3. [Spong M W](#) [Modeling and control of elastic joint manipulators](#) 1987(04)
4. [Taghirad H D, Khosravi M A](#) [Stability analysis and robust composite controller synthesis for flexible joint robots](#) 2002
5. [Ghorbel F, Spong M W](#) [Integral manifold of singularly perturbed systems with application to rigid-link flexible-joint multibody systems](#) 2000(01)
6. [Chang Y Z, Daniel R W](#) [On the adaptive control of flexible joint robot](#) 1992(05)
7. [Brogliato B, Ortega R, Lozano R](#) [Global tracking controllers for flexible joint manipulators: a comparative study](#) 1995(07)
8. [Lewis F L, Yesildirak A, Jagannathan S](#) [Neural Network Control of Robot Manipulators and Nonlinear Systems](#) 1999
9. [Kokotovic P V, Khalil H K, O'Reilly J](#) [Singular Perturbation Methods in Control: Analysis and Design](#) 1986
10. [Bayard D S, Wen J T](#) [New class of control laws for robotic manipulators](#) 1988(05)
11. [Sun F, Sun Z Q, Woo P](#) [Neural network-based adaptive control design of robotic manipulators with an observer](#) 2001(01)
12. [Spong W](#) [Adaptive control of flexible joint manipulators: comments on two papers](#) 1995(04)

相似文献(10条)

1. 期刊论文 [刘华山](#), [朱世强](#), [吴剑波](#), [闫莎莎](#), [LIU Hua-shan](#), [ZHU Shi-qiang](#), [WU Jian-bo](#), [YAN Sha-sha](#) [基于奇异摄动理论的输入有界机器人轨迹跟踪控制—控制理论与应用](#) 2009, 26(12)
 针对机器人轨迹跟踪中驱动扭矩有界的问题, 提出一种基于奇异摄动系统稳定性理论的推广算法. 通过在控制律中引入含有误差增益的饱和函数, 保证扭矩输入绝对值的上界在给定制限范围内. 并可通过适当调节误差增益系数改善系统的轨迹跟踪性能. 同时, 算法中采用仅包含位置跟踪误差信息的线性滤波函数产生用来替代真实速度误差的伪速度误差信号, 使得整个系统的闭环控制不需测量转速. 根据提出的推广算法, 设计了一种全新的输入有界控制律, 验证了算法的有效性. 仿真试验对比结果表明, 该算法能够严格保证扭矩控制输入的有界性, 并在相同参数条件下相比于其他算法, 具有更优的轨迹跟踪效果.
2. 期刊论文 [倪元华](#), [桂克锋](#), [NI Yuan-hua](#), [GUI Ke-feng](#) [基于奇异摄动理论的电驱动机器人神经网络控制—工程数学学报](#) 2007, 24(2)
 在驱动回路电容较小的情况下, 对电驱动刚性机器人操作手的轨迹跟踪问题, 提出了一种基于奇异摄动理论的神经网络控制设计方法. 稳定性分析表明系统跟踪误差最终一致有界, 数值实验验证了所提的算法的可行性和有效性.
3. 期刊论文 [刘华山](#), [朱世强](#), [王宣银](#), [LIU Hua-shan](#), [ZHU Shi-qiang](#), [WANG Xuan-yin](#) [扭矩输入有界的机器人模糊](#)

针对轨迹跟踪控制中机器人关节驱动器输出扭矩受限的问题,提出一种基于模糊自适应PD的输入有界轨迹跟踪控制算法。不同于以往的控制策略,该算法在控制律中引入具有饱和特性的改进反正切函数,以确保扭矩控制输入的有界性,并结合模糊自适应原理实现PD增益的在线自整定。以改善系统的动态特性。通过对位置跟踪误差进行线性滤波得到速度跟踪误差替代信号,使得整个系统的闭环控制仅需位置输出反馈。利用奇异摄动理论对系统进行了稳定性分析,证明在一定约束下的PD增益自整定过程中,仍能保证系统稳定。仿真和比较结果表明,该算法能够在严格保证控制输入有界的前提下,减小超调量,缩短系统调整时间,具有更优的轨迹跟踪性能。

4. 期刊论文 [刘业超, 刘伊威, 刘宏, LIU Ye-chao, LIU Yi-wei, LIU Hong 柔性关节机器人奇异摄动控制 - 电机与控制学报2009, 13\(3\)](#)

传统的奇异摄动控制方法仅适用于关节柔性较小的机器人。针对这一问题,设计了关节柔性补偿器,以提高关节的等效刚度、消除关节柔性对该方法的限制,并将奇异摄动方法推广应用于具有一般关节柔性的机器人系统中。设计了自适应控制规律实现对慢子系统的控制,以保证轨迹误差的渐近跟踪。该控制策略不限制关节柔性大小,并且不需要连杆加速度及其微分信号,便于工程应用。以柔性关节机器人为研究对象进行了实验研究。实验结果表明,对于慢子系统采用PD、计算力矩和自适应控制,本文的控制策略比传统的奇异摄动方案更有效。

5. 学位论文 [隋春平 并联绳索驱动机器人建模与控制 2004](#)

该文将在考虑柔索柔性的情况下,以一种3自由度约束构型为研究对象,对PWDR的建模与控制问题进行研究。首先,分析了3自由度PWDR的运动学与静力学关系。针对该机构的特点,考虑冗余性分析、模型简化及控制规律设计的要求,提出了以约束关节的位置作为描述机构运动的最小维变量。在此基础上分析了柔索空间、关节空间及作业空间的位置关系、速度关系及静力学关系,得到了正位置关系的解析解、关节空间到柔索空间和作业空间的Jacobian矩阵 J_c 、 J_s 和 J_e 及3维力矢量闭合原理。分别利用Lagrange法和Newton-Euler法建立操作臂和驱动单元(包括电机、减速器及绞盘)的动力学模型,并用柔索的集中参数模型将二者联系起来,首次得到了包含柔索柔性的3自由度PWDR系统的动力学模型,并基于这一柔性模型进行了控制系统的分析与设计。其次,基于微分变换原理对操作臂的刚度进行了分析,首次得到了3自由度PWDR完整的刚度矩阵解析表达式。该公式表明操作臂的刚度不仅与柔索的刚度有关,还与柔索的张力有关。基于这一结论,利用柔索的柔性,对操作臂进行了变刚度控制器的设计,首次采用位置控制与柔索张力控制分离的方法实现了机器人刚度控制,即通过3个输入的位置伺服实现刚度控制,1个输入的力伺服实现刚度控制。再次,在对3自由度构型PWDR研究的基础上,对一般构型该类机器人的运动控制和变刚度控制进行了进一步的研究,并得到了6自由度构型的刚度矩阵解析表达式。最后,设计了3自由度PWDR样机,并以该样机为平台对运动控制进行了实验研究。

6. 学位论文 [黄季妮 机器人遥操作系统神经网络控制 2003](#)

机器人遥操作系统中由于信号长距离传输而存在时滞,空间机器人由于重量轻、速度快等特点而存在柔性,这些都使遥操作系统的控制变得困难。该文分别针对刚性机器人和柔性机器人,采用神经网络动态辨识和史密斯预估控制相结合的方法,研究控制系统的设计及遥操作控制系统的设计。在刚性机器人控制方面,采用动态神经网络辨识动力学非线性函数,对机械臂动力学模型进行非线性补偿,使其线性化。在此基础上,采用史密斯预估器消除时滞的影响,设计刚性机器人遥操作系统。在柔性机器人方面,用假设模态法对柔性臂的变形进行近似分析,用拉格朗日法建立了单杆柔性臂动力学模型,采用奇异摄动法将柔性臂系统分解为慢变与快变两个子系统,分别设计控制器。在此基础上,采用史密斯预估器设计柔性机器人遥操作控制系统。动态神经网络的权重修正律采用在线学习算法。

7. 期刊论文 [刘业超, 金明河, 刘宏, LIU Ye-chao, JIN Ming-he, LIU Hong 柔性关节机器人基于柔性补偿的奇异摄动控制 - 机器人2008, 30\(5\)](#)

传统的奇异摄动方法仅适用于关节具有弱柔性的机器人的控制。为了解决这一问题,设计了关节柔性补偿器,大大提高了关节的等效刚度,从而消除了关节柔性对该方法的限制,使得奇异摄动方法能够应用于关节具有一般柔性的机器人系统中。此外,对于慢子系统的控制,选择以投影算法作为参数估计规律的自适应控制器,并证明了它的渐近稳定性。该控制策略没有关节柔性限制,不需要连杆加速度及其微分信号,便于工程应用。最后以本实验室的柔性关节机器人为研究对象进行了实验研究,验证了所提控制策略的有效性和可行性。

8. 学位论文 [吴爱玲 平面并联机器人运动控制的研究 2007](#)

并联机器人作为一种全新的机器人,具有刚度大、承载能力强、误差小、精度高、自重负荷比小、动力性能好等一系列优点,与日前广泛应用的串联机器人在应用上构成互补关系。这类机器人在21世纪将有广阔的发展前景。

平面并联机器人较空间并联机器人结构简单,计算量小,且制造成本低廉,也很容易在其结构上搭建出空间结构机器人,实现空间运动要求。故加强平面并联机器人的机构分析、运动分析和动力学分析研究,既为拓展平面并联机器人的应用所必须也是空间机器人研究的基础。其次,并联机器人应用领域的日益扩展,尤其在太空探索、采矿以及机械设各如机床、工业机器人上的应用,已经超出了体积小、重量轻、速度低的限制。因此,不断深入研究并联机器人的机构学、运动学、动力学建模和控制策略问题,为开发和应用新的并联机器人提供了可能。

本文首先根据掌握的大量并联机器人文献,对其在机构学、运动学、动力学、控制策略等方面的主要研究成果、进展以及尚未解决的问题进行了阐述。描述了平面并联机构的构型分类,接着简单介绍了并联机器人奇异位形研究的现状,并提出了基于微分几何方法的并联机器人奇异位形的判定定理,最后分析了一种2-DOF并联机器人的奇异位形。以2-DOF平面并联机器人机构为研究对象,运用解析方法建立了并联机构的运动学正、逆解方程,这将有利于并联机器人的控制和轨迹规划。

在并联机器人的点位控制研究方面,文中详细推导CKCs(closed kinematics chains)以独立广义坐标表示的降阶模型运动方程,首先应用虚功原理结合拉格朗日方程对该机构进行动力学建模,获得了该机构降阶模型的具体表达式。该模型适于大多数闭链机构的动力学建模,具有区别于开链机构动力学模型的两个基本特性,能够将大量的针对开链机构设计的控制方法应用于CKCs系统。本文还证明了降阶模型具有类似开链机构运动方程的斜对称特性,基于PD+重力补偿的控制方法可以保证系统呈局部渐近稳定性。

含有闭链的并联机器人动力学模型通常由微分一代数方程描述。这类机器人系统的传统控制方法,往往需要采用诸如牛顿迭代等数值方法对非独立坐标进行求解,不利于实时控制。本文考虑机器人惯性参数的不确定性,提出一种基于奇异摄动模型的自适应跟踪控制方法。这种方法将对原系统微分一代数方程的控制转换为对人造奇异摄动模型的控制,从而使算法易于实施。运用Lyapunov理论证明了这种控制器能够保证渐近轨迹跟踪。仿真结果表明了该方法的有效性。

本文最后分别对涉及到的几种控制方法进行了对比分析,论述了不同方法的优势和不足。基于模型的计算力矩控制由于考虑了非线性补偿而极大地提高了其控制品质;滑模自适应的控制方法结合了自适应方法的抑制参数的不确定性及滑模控制方法的抑制非参数不确定性的特性(如外界干扰和未建模动态特性)。本文在控制算法的设计中,分别给出了稳定性证明和分析,进行了算例仿真与分析。

9. 会议论文 [陈启军, 王月娟, 马晓锋, 陈辉堂 宏-微机器人动力学模型的奇异摄动形式的表示方法 1998](#)

宏-微机器人系统包含快过程和慢过程,可用奇异摄动方法分析和控制,通过集中微机器人的小参数,得到了奇异摄动形式的宏-微机器人动力学模型,这一方法具有一般性,平面4自由度宏-微机器人系统的例子证明了该方法的正确性。

10. 学位论文 [李善姬 双连杆柔性机械臂的轨迹控制 1997](#)

该论文共分六章:第一章介绍了柔性机械臂的研究概况、柔性机械臂的动力学建模和控制方案及柔性机械臂实验台的研制等内容。第二章给出了柔性机械臂的动力学模型,并推导了柔性机械臂的奇异摄动模型。第三章简单介绍了滑模控制方法,并用这种方法设计了慢变子系统的控制器。第四章介绍了 H^∞ 控制理论及工程上常见的混合灵敏度问题,并用 H^∞ 优化方法设计了快变子系统的控制器。第五章对控制系统进行了数值仿真,并分析了仿真结果。第六章对全文进行了总结。

引证文献(3条)

1. [徐生](#), [鲍官军](#), [张立彬](#), [杨庆华](#) [气动柔性五自由度手指的神经网络控制](#)[期刊论文]-[中国机械工程](#) 2008 (23)
2. [张晓东](#), [贾庆轩](#), [孙汉旭](#), [褚明](#) [空间机器人柔性关节轨迹控制研究](#)[期刊论文]-[宇航学报](#) 2008 (6)
3. [庄未](#), [方琛玮](#), [刘晓平](#) [1P5R柔性关节机械臂动力学分析与控制](#)[期刊论文]-[中国机械工程](#) 2009 (24)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_zdxb200702010.aspx

授权使用: 西安交通大学(wfxajd), 授权号: 64835729-88cb-4c0d-847e-9db2015534c4

下载时间: 2010年7月13日