

一类受限机器人的学习控制*

蔡刚强 周其节

梁天培

(华南理工大学自动化系, 广州, 510641) (香港理工学院机械与轮机工程系·香港)

摘要: 本文给出了一类受限机器人的一个学习控制方案. 学习控制器的设计是基于受限机器人的奇异模型. 在存在未知的有界干扰的情况下, 对末端操纵器受线性、无摩擦约束面约束的机器人, 本文给出的控制方案实现了机器人运动的完全跟踪, 保证了力跟踪误差是有界的, 并且界的大小是可调节的.

关键词: 机器人; 受限运动; 学习控制; 跟踪

1 引 论

在机器人的许多应用中, 机器人末端操纵器受外界环境约束, 通常有必要同时控制末端操纵器的运动及末端操纵器与约束面之间的接触力. 文献[1~3]给出了受限机器人的数学模型. McClamroch 等^[4]将受限系统变换为非受限的降阶系统, 并提出了一种解决受限机器人稳定性及跟踪问题的方法. 近来, 针对这个问题, 一些其他的控制方法也被提了出来, 如文献[5~8].

受限机器人控制器设计中存在的一个严重问题是我们往往并不知道准确的数学模型. 如果我们忽略各种不确定性因素, 那么设计出的控制器可能会导致系统性能变坏, 甚至可能引起不稳定. 为了克服不确定性因素给控制带来的困难, 非受限机器人系统的自适应控制([9]给出了一个综述)和学习控制^[10~15]的研究一直相当活跃. 近来, 在一些文献中, 如[16, 17], 提出了一些受限机器人系统的自适应控制方法, 但据我们所知, 迄今还没有在文献中看到受限机器人系统学习控制方法的出现.

在本文中, 我们对具有线性约束的一类受限机器人系统, 提出了一种迭代学习控制方案. 在许多实际应用中, 作业的重复性是现代工业机器人的主要技术特征之一. 学习控制是在机器人重复作业过程中, 不断修改控制器中的某些参数, 从而提高系统的性能. 文献[13]给出了学习控制中的一些理想原则, 现简述如下:

- 1) 每次作业终止于有限时间 $t_f > 0$.
- 2) 理想状态 $x_d(t)$ 在 $[0, t_f]$ 上被事先给出.
- 3) 满足初始条件的重复性, 即在每次作业的初始时刻, 系统的初始状态 $x^j(0)$ 满足:

$$x^j(0) = x^0, \quad j = 1, 2, \dots$$

这里 j 表示作业的次数.

- 4) 在每次作业过程中, 系统的数学模型具有重复性.

* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目.
本文于1992年6月27日收到.

5) 在每次作业过程中, 系统状态 $x(t)$ 是可测量的, 从而使 $e^j = x_d(t) - x^j(t)$ 可用于下次作业中控制输入的构成.

2 受限机器人模型及主要性质

对具有 n 个转动关节的受限机器人, 如果约束面是无摩擦的, 那么, 考虑末端操纵器与外界环境之间的接触力, 机器人的数学模型为

$$M(q^j)\ddot{q}^j + C(q^j, \dot{q}^j)\dot{q}^j + G(q^j) + T_a(t) = u^j + f^j, \quad (1)$$

$$\Phi(q^j) = 0. \quad (2)$$

这里 $q^j \in \mathbb{R}^n$ 是关节位移向量, $M(q^j) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是对称正定惯性矩阵, $C(q^j, \dot{q}^j) \dot{q}^j \in \mathbb{R}^n$ 是有关离心力和哥氏项向量, $G(q^j) \in \mathbb{R}^n$ 是重力项向量, $u^j \in \mathbb{R}^n$ 是控制输入向量, $\Phi(q^j)$ 是 m 维约束向量函数; $f^j = J^T(q^j)\lambda^j$, 而 $J(q^j) = [\partial\Phi(q^j)/\partial q^j]$, λ^j 是与约束有关的广义接触力向量.

McClamroch 等^[4]利用一非线性变换将受限系统变换为降阶的非受限系统, 为后面引用方便, 我们将这一非线性变换简述如下.

假设存在一开集 $V = \mathbb{R}^{n-m}$ 及一个可微函数 $\Omega: V \rightarrow \mathbb{R}^m$, 使

$$\Phi(\Omega(q_2^j), q_2^j) = 0, \quad \forall q_2^j \in V,$$

那么下面的非线性变换可使受限系统变换为非受限系统.

考虑非线性变换:

$$x^j = \begin{bmatrix} x_1^j \\ x_2^j \end{bmatrix} = X(q^j) = \begin{bmatrix} q_1^j - \Omega(q_2^j) \\ q_2^j \end{bmatrix}, \quad (3)$$

它是可微的, 并有可微的逆变换

$$q^j = \begin{bmatrix} q_1^j \\ q_2^j \end{bmatrix} = Q(x^j) = \begin{bmatrix} x_1^j + \Omega(x_2^j) \\ x_2^j \end{bmatrix}, \quad (4)$$

逆变换(4)的雅可比矩阵为

$$T(x^j) = \frac{\partial Q(x^j)}{\partial x^j} = \begin{bmatrix} I_m & \partial\Omega(x_2^j)/\partial x_2^j \\ 0 & I_{n-m} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

利用上面的非线性变换, (1), (2)变为

$$\bar{M}(x^j)\dot{x}^j + \bar{C}(x^j, \dot{x}^j)\dot{x}^j + \bar{G}(x^j) + T^T(x^j)T_a(t) = T^T(x^j)u^j + T^T(x^j)\bar{J}^T(x^j)\lambda^j, \quad (6)$$

$$x_1^j = 0, \quad (7)$$

这里 $\bar{M}(x^j) = T^T(x^j)M(Q(x^j))T(x^j)$,

$$\bar{C}(x^j, \dot{x}^j) = T^T(x^j)C(Q(x^j), T(x^j)\dot{x}^j)T(x^j) + T^T(x^j)M(Q(x^j))\dot{T}(x^j),$$

$$\bar{G}(x^j) = T^T(x^j)G(Q(x^j)),$$

$$\bar{J}(x^j) = J(Q(x^j)).$$

在本文中, 我们假设

$$\Phi(q^j) = T_1 q^j + \theta = 0. \quad (8)$$

这里 $T_1 \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 是一常数矩阵且 $\text{rank} T_1 = m$; θ 是一常向量. 不失一般性, 我们将(8)式改写如下

$$\Phi(q^j) = q_1^j + T_2 q_2^j + \theta = 0.$$

这里 $q_1^j \in \mathbb{R}^m$, $q_2^j \in \mathbb{R}^{n-m}$, 而 $T_2 \in \mathbb{R}^{m \times (n-m)}$ 是一个常数矩阵. 于是

$$\bar{J}(x^j) = [I_m \quad T_2]; \quad T(x^j) = \begin{bmatrix} I_m & -T_2 \\ 0 & I_{n-m} \end{bmatrix}.$$

而

$$\bar{M}(x^j) = T^T M(Q(x^j)) T, \quad (9)$$

$$\bar{C}(x^j, \dot{x}^j) = T^T C(Q(x^j), T^T \dot{x}^j) T, \quad (10)$$

$$\bar{G}(x^j) = T^T G(Q(x^j)), \quad (11)$$

引入 $E_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 及 $E_2 \in \mathbb{R}^{(n-m) \times n}$, 它们满足

$$I_n = [E_1^T \quad E_2^T].$$

则(6)式可进一步变为

$$E_1 \bar{M}(x_2^j) E_2^T \dot{x}_2^j + E_1 \bar{C}(x_2^j, \dot{x}_2^j) E_2^T \dot{x}_2^j + E_1 \bar{G}(x_2^j) + E_1 T^T T_0(t) = E_1 T^T u^j + \lambda^j, \quad (12)$$

$$E_2 \bar{M}(x_2^j) E_2^T \dot{x}_2^j + E_2 \bar{C}(x_2^j, \dot{x}_2^j) E_2^T \dot{x}_2^j + E_2 \bar{G}(x_2^j) + E_2 T^T T_0(t) = E_2 T^T u^j. \quad (13)$$

这里 $\bar{M}(x_2^j)$, $\bar{C}(x_2^j, \dot{x}_2^j)$ 及 $\bar{G}(x_2^j)$ 分别表示 $\bar{M}(x^j)$, $\bar{C}(x^j, \dot{x}^j)$ 及 $\bar{G}(x^j)$ 在 $x^j = [0^T \quad x_2^j]^T$ 和 $\dot{x}^j = [0^T \quad \dot{x}_2^j]^T$ 的取值. 考虑到机器人动态模型的一些固有特性(参看有关文献, 如[18]), 我们可直接得到如下性质.

性质 1 矩阵 $E_2 \bar{M}(x_2^j) E_2^T$ 是对称正定阵, 存在常数 $\alpha > 0$, 使得

$$\alpha I_{n-m} \leq E_2 \bar{M}(x_2^j) E_2^T, \quad \forall x_2^j \in \mathbb{R}^{n-m}.$$

性质 2 存在常数 k_M, k_C 及 k_G , 使得对任意的 x_2^j, \dot{x}_2^j , 有

$$\|\bar{M}(x_2^j)\| \leq k_M, \quad \|\bar{C}(x_2^j, \dot{x}_2^j)\| \leq k_C \|\dot{x}_2^j\| \quad \text{及} \quad \|\bar{G}(x_2^j)\| \leq k_G.$$

性质 3 如果适当定义 $C(q, \dot{q})$, 使

$$x^T (\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})) x = 0, \quad \forall x \in \mathbb{R}^n.$$

那么, $E_2 \bar{M}(x_2^j) E_2^T$ 及 $E_2 \bar{C}(x_2^j, \dot{x}_2^j) E_2^T$ 满足

$$y^T (E_2 \bar{M}(x_2^j) E_2^T - 2E_2 \bar{C}(x_2^j, \dot{x}_2^j) E_2^T) y = 0, \quad \forall y \in \mathbb{R}^{n-m}.$$

3 学习控制器设计

在本节中我们对受限机器人的力-位置控制, 给出一个学习控制方案. 首先定义系统的理想轨迹为 $q_d(t)$, 理想接触力为 $f_d(t)$, 它们满足 $\Phi(q_d) = 0, f_d = J^T(q_d) \lambda_d$, 这里 $\lambda_d \in \mathbb{R}^m$ 为一乘子向量. 我们假设 q_d 以及它的第一、二阶导数在 $[0, t_f]$ 上有界.

控制的目的是使受限机器人系统实现位置的完全跟踪, 即

$$\lim_{j \rightarrow \infty} q^j(t) = q_d(t), \quad \forall t \in [0, t_f].$$

同时保证力跟踪误差在 $[0, t_f]$ 上有界并且其界的大小可调节.

由于 $q^j = \Omega(q_2^j)$, 所以只要 $q_2^j \rightarrow q_{2d}$, 即 $x_2^j \rightarrow x_{2d} (x_{2d} \triangleq q_{2d})$, 即可保证实现位置的完全跟踪.

引入以下辅助变量:

$$\dot{x}_{2e}^j = \dot{x}_{2d}^j - \Lambda \dot{x}_2^j, \quad s^j = \dot{x}_2^j - \dot{x}_{2e}^j = \dot{x}_2^j + \Lambda \dot{x}_2^j.$$

这里 $\dot{x}_2^j = \dot{x}_2^j - \dot{x}_{2d}^j$ 为位置跟踪误差, Λ 是常数对角正定矩阵.

我们给出如下的学习控制律:

$$T^T u^j = \bar{M}(x_2^j) E_2^T \dot{x}_{2e}^j + \bar{C}(x_2^j, \dot{x}_2^j) E_2^T \dot{x}_{2e}^j + \bar{G}(x_2^j) - \beta K_D E_2^T s^j + H^j + E_1^T G_f (\lambda^j - \lambda_d) - E_1^T \lambda_d. \quad (14)$$

这里 K_D 是 $n \times n$ 常数正定矩阵, G_f 是 $m \times m$ 常数非负定反馈增益矩阵, β 是一个正数, 而

$$H^{j+1} = H^j - \beta K_D E_2^T s^j, \quad (15)$$

H^1 在 $[0, t_f]$ 上有界.

下面的定理表明:应用控制律(14)保证了受限机器人系统实现位置的完全跟踪,且力跟踪误差在 $[0, t_f]$ 上是有界的和可调节的.

定理 将控制律(14)应用于受限机器人系统,有

1) $\lim_{j \rightarrow \infty} x_2^j(t) = x_{2d}(t), \quad \forall t \in [0, t_f].$

2) $\lambda^j(t) - \lambda_d(t)$ 在 $[0, t_f]$ 上是有界的且是可调节的.

证 将(14)代入(13)得

$$\begin{aligned} & E_2 \bar{M}(x_2^j) E_2^T \dot{x}_2^j + E_2 \bar{C}(x_2^j, \dot{x}_2^j) E_2^T \dot{x}_2^j + E_2 \bar{G}(x_2^j) + E_2 T^T T_a(t) \\ &= E_2 \bar{M}(x_2^j) E_2^T \dot{x}_{2e}^j + E_2 \bar{C}(x_2^j, \dot{x}_2^j) E_2^T \dot{x}_{2e}^j + E_2 \bar{G}(x_2^j) - \beta K_D E_2^T s^j + E_2 H^j, \end{aligned} \quad (16)$$

将上式稍加整理得:

$$E_2 \bar{M}(x_2^j) E_2^T \dot{s}^j + E_2 \bar{C}(x_2^j, \dot{x}_2^j) E_2^T s^j + \beta E_2 K_D E_2^T s^j = E_2 H^j - E_2 T^T T_a(t). \quad (17)$$

设

$$U^j = H^j - T^T T_a(t), \quad (18)$$

则(17)式变为

$$E_2 \bar{M}(x_2^j) E_2^T \dot{s}^j + E_2 \bar{C}(x_2^j, \dot{x}_2^j) E_2^T s^j + \beta E_2 K_D E_2^T s^j = E_2 U^j. \quad (19)$$

我们定义 $V^j(t)$ 如下

$$V^j(t) = \int_0^t (E_2 U^j)^T (E_2 K_D E_2^T)^{-1} (E_2 U^j) d\tau. \quad (20)$$

由(20)可得

$$\begin{aligned} \Delta V^j &\triangleq V^{j+1} - V^j = \int_0^t [(E_2 U^{j+1})^T (E_2 K_D E_2^T)^{-1} (E_2 U^{j+1}) - (E_2 U^j)^T (E_2 K_D E_2^T)^{-1} (E_2 U^j)] d\tau \\ &= \int_0^t [(E_2 \Delta U^j)^T (E_2 K_D E_2^T)^{-1} (E_2 \Delta U^j) + 2(E_2 \Delta U^j)^T (E_2 K_D E_2^T)^{-1} (E_2 U^j)] d\tau. \end{aligned} \quad (21)$$

这里

$$\Delta U^j = U^{j+1} - U^j.$$

由 U^j 的定义及(15)式得

$$E_2 \Delta U^j = E_2 U^{j+1} - E_2 U^j = E_2 H^{j+1} - E_2 H^j = -\beta E_2 K_D E_2^T s^j, \quad (22)$$

将(22)代入(21)得

$$\Delta V^j = \int_0^t [B^2 s^{jT} (E_2 K_D E_2^T) s^j - 2\beta s^{jT} E_2 U^j] d\tau.$$

考虑到(19),有

$$\begin{aligned} \Delta V^j &= \int_0^t [B^2 s^{jT} (E_2 K_D E_2^T) s^j - 2\beta s^{jT} (E_2 \bar{M}(x_2^j) E_2^T \dot{s}^j + E_2 \bar{C}(x_2^j, \dot{x}_2^j) E_2^T s^j + \beta E_2 K_D E_2^T s^j)] d\tau \\ &= -2\beta \int_0^t s^{jT} (E_2 \bar{M}(x_2^j) E_2^T \dot{s}^j + E_2 \bar{C}(x_2^j, \dot{x}_2^j) E_2^T s^j) d\tau - \beta^2 \int_0^t s^{jT} (E_2 K_D E_2^T) s^j d\tau. \end{aligned} \quad (23)$$

因为

$$2 \int_0^t s^{jT} (E_2 \bar{M}(x_2^j) E_2^T) \dot{s}^j d\tau = \int_0^t \frac{d}{d\tau} (s^{jT} (E_2 \bar{M}(x_2^j) E_2^T) s^j) d\tau - \int_0^t s^{jT} (\dot{E}_2 \bar{M}(x_2^j) E_2^T) s^j d\tau$$

及 $E_2 \bar{M}(x_2^j) E_2^T - 2E_2 \bar{C}(x_2^j, \dot{x}_2^j) E_2^T$ 是反对称阵(性质2),所以(23)可写成

$$\Delta V^j = -\beta s^T (E_2 \bar{M}(x_2^j) E_2^T) s^j - \beta^2 \int_0^t s^T (E_2 K_D E_2^T) s^j d\tau \leq 0. \quad (24)$$

这里我们用到了 $s^j(0) = 0$ 这个事实, 这是因为 $\bar{x}_2^j(0) = 0, \dot{\bar{x}}_2^j = 0$. 于是, 对任意 $t \in [0, t_f]$, 有

$$V^{j+1} \leq V^j. \quad (25)$$

由(20), (25)可知 $\{V^j\}$ 是一单调减小的非负序列, 又因为 $T_a(t), H^1$ 在 $[0, t_f]$ 上有界, 所以 U^1 以及 V^1 在 $[0, t_f]$ 上有界, 即

$$V^1(t) = \int_0^t (E_2 U^1)^T (E_2 K_D E_2)^{-1} (E_2 U^1) d\tau < \infty, \quad \forall t \in [0, t_f],$$

所以, 当 $j \rightarrow \infty$ 时, 单调减小的非负序列 $\{V^j\}$ 趋于一个常数, 而 $\Delta V^j \rightarrow 0$. 再考虑到

$$\Delta V^j \leq -\beta s^T (E_2 \bar{M}(x_2^j) E_2^T) s^j \leq 0, \quad (26)$$

可知当 $j \rightarrow \infty$ 时, $s^j \rightarrow 0$, 根据 s^j 的定义, 可知

$$\lim_{j \rightarrow \infty} \bar{x}_2^j(t) = 0, \quad \text{即} \lim_{j \rightarrow \infty} x_2^j(t) = x_{2d}(t), \quad \forall t \in [0, t_f].$$

又因为 $\{V^j\}$ 是单调减小且非负, V^1 在 $[0, t_f]$ 上有界, 所以 ΔV^j 在 $[0, t_f]$ 上有界. 我们将(26)改写为

$$0 \leq \beta s^T (E_2 \bar{M}(x_2^j) E_2^T) s^j \leq |\Delta V^j|,$$

这意味着 s^j 在 $[0, t_f]$ 上有界, 因而 x_2^j, \dot{x}_2^j 在 $[0, t_f]$ 上有界. 再考虑到 $H^{j+1} = H^j + \beta K_D E_2^T s^j$ 及 H^1 在 $[0, t_f]$ 上有界. 所以 H^j 以及 U^j 在 $[0, t_f]$ 上有界, 再根据(19)可知 s^j 在 $[0, t_f]$ 上有界.

将(14)代入(12), 得

$$\begin{aligned} & E_1 \bar{M}(x_2^j) E_2^T \ddot{x}_2^j + E_1 \bar{C}(x_2^j, \dot{x}_2^j) E_2^T \dot{x}_2^j + E_1 \bar{G}(x_2^j) + E_1 T^T T_a(t) \\ &= E_1 \bar{M}(x_2^j) E_2^T \ddot{x}_2^j + E_1 \bar{C}(x_2^j, \dot{x}_2^j) E_2^T \dot{x}_2^j + E_1 \bar{G}(x_2^j) - \beta E_1 K_D E_2^T s^j + E_1 H^j + (G_f + I_m)(\lambda^j - \lambda_d). \end{aligned}$$

对上式稍加整理, 得

$$\begin{aligned} & E_1 \bar{M}(x_2^j) E_2^T s^j + E_1 \bar{C}(x_2^j, \dot{x}_2^j) E_2^T s^j + \beta E_1 K_D E_2^T s^j \\ &= E_1 U^j + (G_f + I_m)(\lambda^j - \lambda_d). \end{aligned} \quad (28)$$

因为 $s^j, \dot{s}^j, x_2^j, \dot{x}_2^j$ 及 U^j 在 $[0, t_f]$ 上有界, 所以 $\lambda^j - \lambda_d$ 在 $[0, t_f]$ 上有界且其界的大小与 $(G_f + I_m)$ 的范数的大小成反比.

4 仿真结果

我们以图1所示的两转动关节机器人和以半径为 r 的圆作为约束的受限运动为例, 来验证本文给出的学习控制方案的有效性, 在本例中

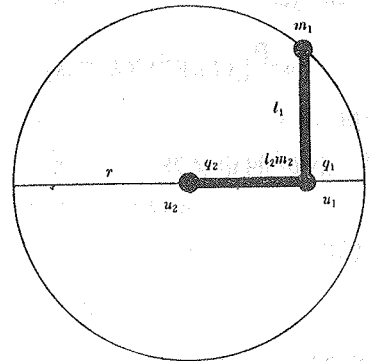


图1 受圆约束的两杆机器人

$$\begin{aligned} M(q^j) &= \begin{bmatrix} m_1 l_1^2 & m_1 l_1 l_2 \cos q_1^j \\ m_1 l_1 l_2 \cos q_1^j & (m_1 + m_2) l_2^2 + m_1 l_1^2 + 2m_1 l_1 l_2 \cos q_1^j \end{bmatrix}, \\ C(q^j, \dot{q}^j) &= \begin{bmatrix} 0 & m_1 l_1 l_2 \dot{q}_2^j \\ -m_1 l_1 l_2 (q_1^j + q_2^j) \sin q_2^j & -m_1 l_1 l_2 \dot{q}_1^j \sin q_1^j \end{bmatrix}, \\ G(q^j) &= \begin{bmatrix} -[m_1 l_1 \cos(q_1^j + q_2^j)] g \\ -[(m_1 + m_2) l_2 \cos q_1^j + m_1 l_1 \cos(q_1^j + q_2^j)] g \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$T_a(t) = \begin{bmatrix} 0.5 + 0.5\cos(10t) \\ 1 + 0.5\sin(10t) \end{bmatrix}$$

约束面可由下式表示

$$\Phi(q^j) = q_1^j - r = 0.$$

这里 r 是一常数, 所以 $J^T(q^j) = [1 \ 0]^T$, 而 $f_2 \equiv 0$.

在本例中, 我们假设

$$m_1 = m_2 = 1\text{kg}, \quad l_1 = l_2 = 1\text{m}, \quad r = \sqrt{2}\text{m}.$$

于是 $r = \frac{\pi}{2}$. 而理想轨迹和理想约束力分别为

$$q_d = [0 \ \sin(2t)]^T$$

和

$$f_d = [7 \ 0]^T.$$

并且

$$K_D = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}, \quad \Lambda = 2,$$

$$\beta = 2, \quad H^1 = 1, \quad G_f = 4.$$

图 2 给出了 $j=1$ 和 $j=20$ 时的运动轨迹及约束力.

5 结 论

本文研究了一类受限机器人的力-位置学习控制问题. 基于受限机器人的降阶模型, 给出了一个学习控制方案. 使受限机器人在存在未知有界干扰的情况下实现了位置的完全跟踪, 同时保证了力跟踪误差是有限的且可调节的, 而且设计出的学习控制器结构简单, 控制信号中不包含对加速度的测量或估计.

参 考 文 献

- [1] McClamroch, N. H. and Huang, H. P.. Dynamics of a Closed Chain Manipulator. Proc. Amer. Contr. Conf., 1985, 50-54
- [2] McClamroch, N. H.. Singular Systems of Differential Equations as Dynamical Models for Constrained Robot Systems. Proc. IEEE Conf. Robotics Automat., 1986, 21-28
- [3] Huang, H. P.. The Unified Formulation of Constrained Robot Systems. Proc. IEEE Conf. Robotics Automat., 1988, 1590-1592
- [4] McClamroch, N. H. and Wang, D.. Feedback Stabilization and Tracking of Constrained Robots. IEEE Trans. Automat. Contr., 1988, AC-33, 419-426
- [5] Mills, J. K. and Goldenberg, A. A.. Force and Position Control of Manipulators During Constrained Motion Tasks. IEEE Trans. Robotics Automat., 1989, RA-5, 30-46
- [6] Krishnan, H. and McClamroch, N. H.. A New Approach to Position and Contact Force Regulation in Constrained Robot Systems. Proc. IEEE Conf. Robotics Automat., 1990, 1344-1349
- [7] Mills, J. K.. Hybrid Control: A Constrained Motion Perspective. J. Robotics Syst., 1991, 8, 135-158

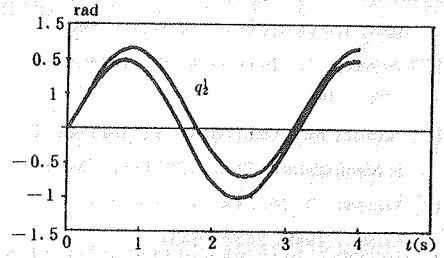


图 2(a) $j=1$ 时第二关节位置跟踪误差

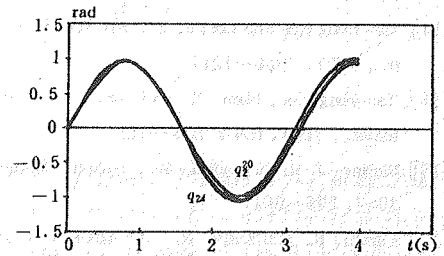


图 2(b) $j=20$ 时第二关节位置跟踪误差

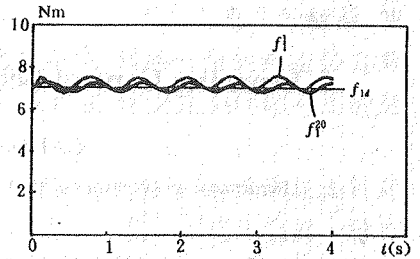


图 2(c) $j=1$ 和 $j=20$ 时力跟踪误差

- [8] Liu, J. S. . Hybrid Position/Force Tracking for a Class of Constrained Mechanical Systems. *Syst. Contr. Lett.*, 1991, 17, 395—397
- [9] Ortega, R. and Spong, M. . Adaptive Motion Control of Rigid Robots; a Tutorial. *Proc. IEEE Conf. Decision Contr.*, 1988, 1575—1584
- [10] Arimoto, S., Kawamura, S. and Miyasaki, F. . Bettering Operation of Robots by Learning. *J. Robotics Syst.*, 1984, 123—140
- [11] Aicardi, M., Casalino, G. and Bartolini, G. . Combined Learning and Identification Techniques in the Control of Robotic Manipulators. *Proc. IEEE Conf. Decision Contr.*, 1989, 1651—1656
- [12] Dawson, D. M., Qu, Z. and Dorsey, J. F. . On the Learning Control of a Robot Manipulator. *Proc. Conf. Decision Contr.*, 1989, 2632—2634
- [13] Arimoto, S. . Learning Control Theory for Robotic Motion. *Int. J. Adaptive Control and Signal Processing*, 1990, 4, 543—564
- [14] Tae-Yong Kuc and Lee, J. S. . An Adaptive Learning Control of Uncertain Robotic Systems. *Proc. Conf. Decision Contr.*, 1991, 1206—1211
- [15] Tae-yong Kuc, Nam, K. and Lee, J. S. . An Iterative Learning Control of Manipulators. *IEEE Trans. Robotics Automat.*, 1991, RA-7, 835—842
- [16] Slotine, J. J. E. and Li, W. . Adaptive Strategies in Constrained Manipulators. *Proc. IEEE Conf. Robotics Automat.*, 1987, 595—601
- [17] Carelli, R. and Kelly, R. . An Adaptive Impedance/Force Controller for Robot Manipulators. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1991, AC-36, 967—971
- [18] Middleton, R. H. . Hybrid Adaptive Control for Robot Manipulators. *Proc. IEEE Conf. Decision Contr.*, 1988, 1592—1597

A Learning Control Scheme for a Class of Constrained Robots

CAI Gangqiang and ZHOU Qijie

(Department of Automation, South China University of Technology • Guangzhou, 510641, PRC)

T. P. Leung

(Department of Mechanical and Marine Engineering, Hong Kong Polytechnic, Hong Kong)

Abstract: An iterative Learning control scheme is presented for a class of constrained robots in this paper. The learning Controller design is based on singular model robot representation. The control scheme guarantees the perfect motion tracking of the robot with its end-effector moving on a linear and frictionless constrained surface in the presence of unknown bounded disturbances. The bounded and adjustable force tracking error is obtained.

Key words: robot; constrained motion; learning control; tracking

本文作者简介

蔡刚强 1957年生. 1982年于中南工业大学获学士学位, 1987年于华南理工大学获硕士学位, 现为该校自动化系在读博士生. 研究兴趣为自适应控制, 变结构控制, 非线性控制系统.

周其节 1931年生. 1951年毕业于中山大学, 1955年哈尔滨工业大学研究生毕业, 现为华南理工大学自动化系教授, 博士生导师. 主要研究领域为非线性系统理论, 线性系统理论, 自适应控制系统, 变结构控制系统及机器人与控制. 近年来发表有关论文六十余篇.

梁天培 1946年生. 1967年毕业于香港大学机械工程系, 而后获得香港大学硕士、伦敦大学哲学博士和清华大学工学博士学位, 现任香港理工大学工程学院院长及机械工程教授. 香港工程师学会会长. 研究兴趣为自动控制、CAD专家系统、机器人及其控制.