

文章编号: 1001-0920(2010)03-0433-04

## 参数不确定柔性机械手的快速终端滑模控制

张德江<sup>1</sup>, 张袅娜<sup>1</sup>, 冯 勇<sup>2</sup>

(1. 长春工业大学 电气与电子工程学院, 长春 130012; 2. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 针对具有参数不确定性的柔性机械手, 采用重新定义系统输出的方法, 将系统分解为输入输出子系统和零动态子系统. 对于输入输出子系统提出了一种递阶快速终端滑模控制策略, 使得输入输出子系统在有限时间内收敛. 将零动态子系统在平衡点近似线性化以选择控制器的设计参数, 使零动态子系统在平衡点附近渐近稳定, 从而保证了整个柔性机械手系统的渐近稳定, 对系统中的不确定性具有较强的鲁棒性. 仿真结果验证了所提方法的正确性.

**关键词:** 柔性机械手; 快速终端滑模; 不确定

**中图分类号:** TP13      **文献标识码:** A

## Fast terminal sliding mode control for flexible manipulators with uncertain parameters

ZHANG De-jiang<sup>1</sup>, ZHANG Niao-na<sup>1</sup>, FENG Yong<sup>2</sup>

(1. Department of Electrical and Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China. Correspondent: ZHANG Niao-na, E-mail: zhangniaona@163.com)

**Abstract:** The system is decomposed into input-output subsystem and the zero dynamics subsystem for flexible manipulators with uncertain parameters through the output of manipulators system is redefined. The fast terminal sliding mode control is proposed for input-output subsystem, which can guarantee the input-output subsystem to converge to zero in finite time. The zero dynamics subsystem is approximation lineared at the equilibrium point to select the design control parameters, and the zero dynamics subsystem is asymptotically stable at equilibrium point. Thus the entire flexible manipulator system is guaranteed to be asymptotically stable. The system has strong robustness to the uncertainty of the system. The simulation results show the correction of the design.

**Key words:** Flexible manipulator; Fast terminal sliding mode; Uncertain

### 1 引 言

柔性机械手由于测量和建模的不精确、负载的变化以及外部扰动的影响, 很难得到精确、完整的运动模型. 而这些不确定性的存在<sup>[1,2]</sup>可能会引起控制系统品质恶化, 甚至成为系统不稳定的原因. 目前关于柔性机械手的许多控制策略均是基于精确的数学模型建立的, 而在实际应用中系统的不确定性必然存在, 因此不确定柔性机械臂系统的控制显得更为重要. 由于滑动模态可按照需要设计, 且系统的滑模运动与控制对象的参数变化和系统的外界干扰无关, 滑模变结构控制在柔性机械手系统的控制中获得了广泛的应用<sup>[3-7]</sup>.

近期, 有研究人员提出了一种重新定义输出的

解决方法<sup>[8]</sup>, 使得在新的系统输出定义下, 柔性机械手系统在平衡点附近由非最小相位系统变为易于控制的最小相位系统<sup>[9]</sup>. 因此本文首先建立包含不确定项的柔性机械手方程, 将关节电机转角和柔性模态变量的线性组合作为柔性机械手系统的输出, 通过输入输出线性化, 将系统分解为输入输出子系统和零动态子系统两部分; 在此基础上提出了快速终端滑模控制策略, 使得输入输出子系统有限时间收敛; 将零动态子系统在平衡点近似线性化进行控制器设计参数的选择, 从而保证了整个柔性机械手系统的渐近稳定.

### 2 柔性机械手模型的不确定分析

考虑柔性机械手系统<sup>[9]</sup>

收稿日期: 2009-04-08; 修回日期: 2009-06-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60474016).

作者简介: 张德江(1954—), 男, 长春人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、非线性系统控制等研究; 张袅娜(1972—), 女, 长春人, 副教授, 博士, 从事鲁棒控制、非线性系统控制等研究.

$$M(\theta, q) \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_r + E_1 \dot{\theta} \\ f_f + Kq + E_2 \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} u(t). \quad (1)$$

其中:  $\theta \in R^2$  为关节电机转角向量,  $q \in R^{2r}$  为柔性模态向量;  $u \in R^2$  为控制转矩向量,  $f_r \in R^2$  和  $f_f \in R^{2r}$  分别为受重力、哥氏力和离心力影响的项,  $E_1 \in R^{2 \times 2}$  和  $E_2 \in R^{2r \times 2r}$  分别为正定阻尼矩阵,  $K \in R^{2r \times 2r}$  为正定刚度矩阵,  $M \in R^{2(r+1) \times 2(r+1)}$  为正定惯量矩阵,  $r$  为柔性模态的个数.

柔性机械手的端点位移为

$$y_i(L_i, t) = L_i \theta_i + \Phi_{ie}^T q_i(t), \quad i = 1, 2.$$

当系统存在不确定性时, 假设参数  $M, f_r, f_f, E_1, E_2, K$  的标称量分别为  $M_n, f_m, f_{fn}, E_{1n}, E_{2n}, K_n$ . 定义  $\Delta M = M - M_n, \Delta f_r = f_r - f_m, \Delta f_f = f_f - f_{fn}, \Delta E_1 = E_1 - E_{1n}, \Delta E_2 = E_2 - E_{2n}, \Delta K = K - K_n$  表示系统中存在的参数不确定性, 则柔性机械手系统(1)可重新改写为

$$\begin{bmatrix} f_m + \Delta f_r + (E_{1n} + \Delta E_1) \dot{\theta} \\ f_{fn} + \Delta f_f + (K_n + \Delta K)q + (E_{2n} + \Delta E_2) \dot{q} \end{bmatrix} + (M_n + \Delta M) \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_n + \Delta B \\ 0 \end{bmatrix} u(t). \quad (2)$$

令

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Delta f_r + \Delta E_1 \dot{\theta} \\ \Delta f_f + \Delta Kq + \Delta E_2 \dot{q} \end{bmatrix} - \Delta M \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta B \\ 0 \end{bmatrix} u(t),$$

假设满足  $\|d_1\| < L_1, \|d_2\| < L_2$ , 并令矩阵  $N_n = M_n^{-1} = [N_{11n}, N_{12n}; N_{21n}, N_{22n}]$ , 因此可将不确定的柔性机械手系统方程(2)改写为

$$\ddot{\theta} = -N_{11n}(f_m + E_{1n}\dot{\theta}) - N_{12n}(f_{fn} + K_nq + E_{2n}\dot{q}) + N_{11n}u(t) + N_{11n}d_1 + N_{12n}d_2, \quad (3)$$

$$\ddot{q} = -N_{21n}(f_m + E_{1n}\dot{\theta}) - N_{22n}(f_{fn} + K_nq + E_{2n}\dot{q}) + N_{21n}u(t) + N_{21n}d_1 + N_{22n}d_2. \quad (4)$$

重新定义柔性机械手系统的输出为

$$z(t) = \lambda_0 \theta(t) + \lambda_1 q(t) = g_1^T x(t). \quad (5)$$

其中:  $g_1^T = [\lambda_0, \lambda_1, 0, 0]$ ; 设计参数  $\lambda_0$  和  $\lambda_1$  分别为  $2 \times 2$  维和  $2 \times 2r$  维对角阵, 且  $\lambda_0$  对角线上的各个元素均为非零值.

对式(2)两次求导得到输入输出子系统为

$$\ddot{z}(t) = \alpha_n + \beta_n u(t) + d(\lambda_0, \lambda_1, x, u). \quad (6)$$

其中:  $z = [z_1, z_2]^T$ ;  $d(\lambda_0, \lambda_1, x, u)$  表示系统中的参数不确定部分, 即

$$d = \lambda_0(N_{11n}d_1 + N_{12n}d_2) + \lambda_1(N_{21n}d_1 + N_{22n}d_2);$$

$$\alpha_n = [-(\lambda_0 N_{11n} + \lambda_1 N_{21n})(f_m + E_{1n}) -$$

$$(\lambda_0 N_{12n} + \lambda_1 N_{22n})(f_{fn} + K_nq + E_{2n}\dot{q})];$$

$$\beta_n = [\lambda_0 N_{11n}(\theta, q) + \lambda_1 N_{21n}(\theta, q)],$$

且  $\beta_n$  可逆;  $d(\lambda_0, \lambda_1, x, u) = [d_1; d_2]$ , 假设  $L$  为  $d$  的上界, 即  $\|d(\lambda_0, \lambda_1, x, u)\| \leq L$ .

当特定的控制输入  $u$  使得输入输出子系统的输出为零时, 内部子系统即为零动态子系统. 由

$$\ddot{z}(t) = \alpha_n + \beta_n u(t) + d(\lambda_0, \lambda_1, x, u) = 0,$$

可得

$$u(t) = -\beta_n^{-1}(\alpha_n + d(\lambda_0, \lambda_1, x, u)),$$

代入内部子系统(4)得

$$\ddot{q} = [-N_{22n} + N_{21n}(\lambda_0 N_{11n} + \lambda_1 N_{21n})^{-1}(\lambda_0 N_{12n} + \lambda_1 N_{22n})](f_{fn} + K_nq + E_{2n}\dot{q} - d_2). \quad (7)$$

可见通过采用重新定义系统输出的方法, 将柔性机械手系统分解为输入输出子系统(6)和零动态子系统(7).

### 3 柔性机械手的递阶快速终端滑模控制

#### 3.1 输入输出子系统的递阶快速终端滑模控制

首先将输入输出子系统(1)改写为

$$\dot{z}_1 = z_2,$$

$$\dot{z}_2(t) = \alpha_n + \beta_n u(t) + d(\lambda_0, \lambda_1, x, u). \quad (8)$$

对于输入输出子系统(8), 首先将滑模设计为一种具有递归结构的快速滑动模态<sup>[10]</sup>, 表示为

$$s_0 = z_1,$$

$$s_1 = \dot{s}_0 + C_1 s_0 + C_2 s_0^{q_0/p_0}. \quad (9)$$

其中:  $c_1, c_2 \in R^{2 \times 2}$  为对角阵,  $c_1 = \text{diag}(c_{11}, c_{12}), c_2 = \text{diag}(c_{21}, c_{22})$ , 均为快速滑模的设计参数矩阵;  $s_0 = [s_{01}, s_{02}]^T, s_1 = [s_{11}, s_{12}]^T$ ;  $p_0$  和  $q_0$  均为正奇数, 满足  $q_0 < p_0 < 2q_0$ ; 向量  $s_0^{q_0/p_0}$  定义为  $s_0^{q_0/p_0} = [s_{01}^{q_0/p_0}, s_{02}^{q_0/p_0}]^T$ .

**定理 1** 对于输入输出子系统(8), 如果快速滑模选取为式(9)的形式, 控制  $u(t)$  设计如下:

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_n(t), \quad (10)$$

$$u_{eq}(t) = -\beta_n^{-1}(\alpha_n + C_1 \dot{s}_0 + C_2 \frac{d}{dt} s_0^{q_0/p_0}),$$

$$u_n(t) = -\beta_n^{-1}(\varphi s_1 + \gamma s_1^{q_1/p_1}).$$

则系统(8)的状态在有限时间收敛到零. 其中:  $\varphi = \text{diag}(\varphi_1, \varphi_2), \gamma = \text{diag}(\gamma_1, \gamma_2), \varphi_i > 0, \gamma_i > 0$ , 且有

$$\gamma_i = \begin{cases} \frac{L_i}{|s_{1i}^{q_1/p_1}|} + \eta_i, & s_{1i} \neq 0; \\ \eta_i, & s_{1i} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

$$\eta_i > 0, \quad i = 1, 2.$$

**证明** 考虑 Lyapunov 函数  $V(t) = 0.5s_{1i}^2$ , 对  $V(t)$  求导, 得到

$$\dot{V}(t) = s_{1i} \dot{s}_{1i} =$$

$$s_{1i} (\ddot{z}_1 + C_1 \dot{s}_{0i} + C_2 \frac{d}{dt} s_{0i}^{q_0/p_0}) =$$

$$s_{1i} (d_i - \varphi_i s_{1i} - \gamma_i s_{1i}^{q_1/p_1}) \leq$$

$$s_{1i} \frac{|d_i|}{|s_{1i}^{q_1/p_1}|} s_{1i}^{q_1/p_1} - \left( \frac{L_i}{|s_{1i}^{q_1/p_1}|} + \eta_i \right) s_{1i} s_{1i}^{q_1/p_1}. \quad (12)$$

因为  $p_1$  和  $q_1$  均为正奇数, 即  $p_1 + q_1$  为偶数,  $s_{1i}^{(q_1+p_1)/p_1} \geq 0$ , 所以当  $s_{1i} \neq 0$  时, 得

$$\dot{V}(t) \leq ((|d_i| - L_i) |s_{1i}^{q_1/p_1}|^{-1} - \eta_i) s_{1i} s_{1i}^{q_1/p_1} \leq -\eta_i s_{1i} s_{1i}^{q_1/p_1} < 0.$$

可见, 根据 Lyapunov 稳定定理, 输入输出子系统(7) 可在有限时间到达滑模面.

令  $\gamma'_i = \gamma_i - d_i/s_{1i}^{q_1/p_1}$  ( $i = 1, 2$ ), 将控制输入(10) 带入  $\dot{s}_{1i}$ , 得

$$\dot{s}_{1i} = -\phi_i s_{1i} - \gamma'_i s_{1i}^{q_1/p_1}. \quad (13)$$

求解方程(13) 得到输入输出子系统有限收敛时间为

$$t_{si} = \frac{p_1}{\phi_i(p_1 - q_1)} \ln \frac{\phi_i [z_{1i}(0)]^{(p_1 - q_1)/p_1} + \gamma'_i}{\gamma'_i}. \quad (14)$$

又由  $\gamma_i > L_i |s_{1i}^{q_1/p_1}|^{-1}$ , 得  $|s_{1i}| < (L_i \gamma_i^{-1})^{p_1/q_1}$ . 因此在控制规律(10) 的作用下, 系统状态沿式(13) 在有限时间(14) 内到达滑模面  $s_{1i} = 0$  的  $\Omega_0 = \{z: |s_{1i}| < (L_i \gamma_i^{-1})^{p_1/q_1}\}$  的邻域内.  $\square$

### 3.2 零动态子系统特性分析

在系统(7) 的平衡点  $x = 0$  处将零动态子系统线性化. 定义  $\Omega_1$  为  $x = 0$  的邻域, 在  $\Omega_1$  域上将式(1) 中的矩阵  $N$  和  $f_f(\theta, q)$  在  $x = 0$  处按泰勒级数展开, 可得

$$N(\theta, q)|_{x \in \Omega_1} = M^{-1}(\theta, q)|_{x \in \Omega} = N_0 + f_{\text{hot}}(x), \quad (15)$$

$$f_f(\theta, q)|_{x \in \Omega_1} = f_{\text{hot}}(x). \quad (16)$$

其中:  $N_0 = [N_{11}(0), N_{12}(0); N_{21}(0), N_{22}(0)] = [N_{110}, N_{120}; N_{210}, N_{220}]$ ;  $f_{\text{hot}}$  为状态变量  $x$  的高阶项.

令

$$P_0 = N_{220} - N_{210}(\lambda_0 N_{110} + \lambda_1 N_{210})^{-1}(\lambda_0 N_{120} + \lambda_1 N_{220}),$$

则式(7) 可改写为

$$\ddot{q} = -P_0 K_n q - P_0 E_{2n} \dot{q} + G_\Delta. \quad (17)$$

其中

$$G_\Delta = f_{\text{hot}} + \Delta f,$$

$$\|\Delta f\| = \|-P_0 d_2\| \leq L_2 \|-P_0\|.$$

假设在零点附近高次项  $f_{\text{hot}}$  满足  $\|f_{\text{hot}}\| \leq L_3$ , 则有  $\|G_\Delta\| = \|f_{\text{hot}} + \Delta f\| \leq L_3 + L_2 \|-P_0\|$ . 记常量  $\varepsilon = L_3 + L_2 \|-P_0\|$ , 则零动态方程(17) 为

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} = A(\lambda_0, \lambda_1) \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ G_\Delta \end{bmatrix}, \quad (18)$$

其中  $A(\lambda_0, \lambda_1) = [0, I; -P_0 K, -P_0 E_2]$ . 令  $\Delta = [q$

$\dot{q}]^T, G = [0 \ G_\Delta]^T$ , 则有  $\dot{\Delta} = A\Delta + G, G$  满足  $\|G\| = \|G_\Delta\| \leq \varepsilon$ . 如果在系统平衡点处线性化后的系统是严格稳定的, 即  $A(\lambda_0, \lambda_1)$  的特征值严格保证在复平面的左半平面, 则原非线性系统的平衡点是渐近稳定的. 因此根据文献[5],  $\lambda_0$  和  $\lambda_1$  选取如下:

$$\lambda_0 = \text{diag}(9.5279, 4.3033),$$

$$\lambda_1 = [0.1208, 2.8367, 0, 0; 0, 0, 0.7565, 0.4048].$$

选取李亚普诺夫方程  $A^T P + PA = -Q$ , 对于任意给定的正定对称矩阵  $Q$ , 有唯一正定对称矩阵解  $P$ . 为此取能量函数  $V = \Delta^T P \Delta$ , 则有

$$\dot{V} = \dot{\Delta}^T P \Delta + \Delta^T P \dot{\Delta} = -\Delta^T Q \Delta + 2\Delta^T P G.$$

记  $\lambda_\Delta = \lambda_{\min}(Q)$ , 有

$$\dot{V} \leq -\lambda_\Delta \|\Delta\|^2 + 2\varepsilon \|P\| \|\Delta\|.$$

当  $\|\Delta\| > 2\varepsilon \|P\| / \lambda_\Delta$  时,  $\dot{V} < 0$ . 可见零动态子系统柔性模态收敛, 即

$$\|q\| \leq \|\Delta\| \leq 2\varepsilon \|P\| / \lambda_\Delta. \quad (19)$$

再由  $z(t) = \lambda_0 \theta + \lambda_1 q = 0$ , 可得

$$\|\theta\| = \frac{\|\lambda_1\| \|q\|}{\|\lambda_0\|} \leq \frac{2\varepsilon \|P\| \|\lambda_1\|}{\lambda_\Delta \|\lambda_0\|}. \quad (20)$$

因此将式(19) 和(20) 带入(1), 求得柔性机械手末端位移(4) 渐近收敛到零附近的邻域为

$$\Omega_2 =$$

$$\{y_i: |y_i| \leq L_i |\theta_i| + \|\Phi_w\| |q_i|, i = 1, 2\}.$$

### 4 仿真分析

为了验证本文所提出的控制策略的有效性, 作仿真如下: 机械手的参数为  $L_1 = 0.8\text{m}, L_2 = 0.8\text{m}, \rho_1 = 1.1718\text{kg/m}, \rho_2 = 0.5859\text{kg/m}, M_{t1} = 0.5\text{kg}, M_{t2} = 0\text{kg}, E_{t1} = 544.32\text{N} \cdot \text{m}^2, EI_2 = 68.04\text{N} \cdot \text{m}^2, J_1 = 2.0\text{kg} \cdot \text{m}^2, J_2 = 0.4\text{kg} \cdot \text{m}^2, J_h = 0\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ; 系统状态初始值选取为  $\theta_1(0) = 1\text{rad}, \theta_2(0) = 0.5\text{rad}$ , 其余为 0; 假设柔性机器人系统的负载范围为  $0 \sim 0.5\text{kg}$ , 取  $m_{t2} = 0\text{kg}$  为标称值, 在仿真时间 6s 时添加端点负载  $m_{t2} = 0.45\text{kg}$ ; 系数选取为  $c_1 = c_2 = \text{diag}(2, 2), \phi = \text{diag}(5, 5), \eta_i = 0.01, p_1/q_1 = p_0/q_0 = 3/5$ . 仿真结果如图 1 和图 2 所示.

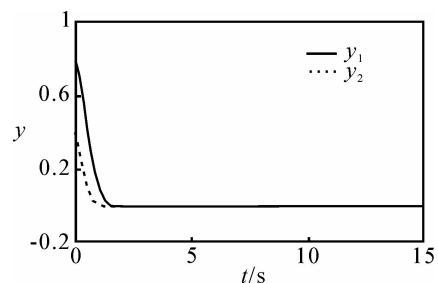


图 1 端点位移  $y$

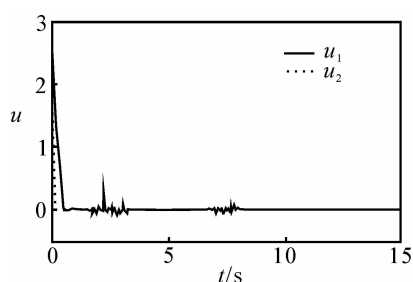


图2 滑模控制输入  $u$

由仿真结果可见,机械臂端点位移渐近收敛到零,控制输入中没有频繁的切换现象,系统抖动被明显地削弱.因此本文提出的不确定柔性机器人的递阶快速终端滑模控制策略是有效的.

## 5 结 论

将关节电机转角和柔性模态变量的线性组合作为柔性机械手系统的输出,通过输入输出线性化,将系统分解为输入输出子系统和零动态子系统两部分.针对输入输出子系统,提出了快速终端滑模控制策略,使得输入输出子系统在有限时间内收敛,将零动态子系统在平衡点近似线性化以选择控制器的设计参数,使零动态子系统在平衡点附近渐近稳定,保证了整个柔性机械手系统的渐近稳定,提高了控制系统的实际工程应用价值,且所提出的控制策略对系统中的不确定性均具有较强的鲁棒性.

## 参考文献(References)

- [1] Kim K S, Park Y. Robust sliding hyperplane design for parametric uncertain systems by riccati approach[C]. Proc of the American Control Conf Philadelphia, 1998: 579-583.
- [2] 李辉, 谢剑英. 不满足匹配条件的非确定性系统的鲁棒滑模控制[J]. 自动化学报, 2001, 27(2): 252-257. (Li H, Xie J Y. Rrobust smc of uncertain time-varying systems dissatisfying matching condition [J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(2): 252-257.)
- [3] Feng Y, Yu X, Man Z. Non-singular adaptive terminal sliding mode control of rigid manipulators [J]. Automatica, 2002, 38(12): 2159-2167.
- [4] Feng Y, Bao S, Yu, X. Inverse dynamics non-singular terminal sliding mode control of two-link flexible manipulators[J]. Int J of Robotics and Automation, 2004, 19(2): 91-102.
- [5] 张袅娜, 张德江, 冯勇. 基于混沌遗传算法的柔性机械手滑模控制器优化设计[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(3): 451-455. (Zhang N N, Zhang D J, Feng Y. The optimal design of terminal sliding controller for flexible manipulators based on chaotic genetic algorithm[J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(3): 451-455.)
- [6] Feng Y, Bao S, Yu X. Inverse dynamics terminal sliding mode control of two-link flexible manipulators [C]. Proc of the Third International DCDIS Conf on Engineering Applications and Computational Algorithms. Watam Press, 2003: 52-57.
- [7] Sanz A, Etxebarria V. Composite robust control of a laboratory flexible manipulator [C]. The 44th IEEE Conf on Decision and Control. New York: IEEE Control Systems Society, 2005: 3614-3619.
- [8] Moallem M, Patel R V, Khorasani K. Flexible-link robot manipulators: Control techniques and structural design[Z]. Singapore: Springer, 2000: 57-72.
- [9] Wang W J, Lu S S, Hsu C F. Experiments on the position control of a one-link flexible robot arm [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1989, 5(3): 373-377.
- [10] Wang W J, Lu S S, Hsu C F. Experiments on the position control of a one-link flexible robot arm [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1989, 5(3): 373-377.
- [5] 李二超, 李炜. 在未知环境下面向位控机器人的力/位混合控制[J]. 煤炭学报, 2007, 32(6): 657-661. (Li E C, Li W. Hybrid force/position control for positional-controlled robotic manipulators in unknown environment[J]. J of China Coal Society, 2007, 32(6): 657-661.)
- [6] Farahmand A M, Shademan A, Jagersand M. Global visual-motor estimation for uncalibrated visual servoing [C]. IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems. San Diego, 2007: 1969-1974.
- [7] Qingshan Fu, Zhisheng Zhang, Jinfei Shi. Uncalibrated visual servoing using more precise model robotics[C]. 2008 IEEE Conf on Automation and Mechatronics. Chengdu, 2008: 916-921.
- [8] 乔兵. 智能机器人主动力/位学习控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1999. (Qiao B. The active learning position/force control for intelligent robotic manipulators[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1999.)

(上接第432页)