

文章编号: 1001-0920(2010)01-0105-05

移动机械手运动/力鲁棒自适应轨迹跟踪

王红旗^{1,2}, 王庆林¹

(1. 北京理工大学 自动化学院, 北京 100081; 2. 河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 针对移动机械手控制器设计中用隐函数定理进行模型降阶时存在的一些问题, 把完整和非完整约束的统一形式引入到系统的动力学模型降阶中. 基于该降阶模型设计了不确定移动机械手稳定的运动/力鲁棒自适应线性参数模糊控制器. 理论分析和仿真结果表明, 设计的控制器简单有效.

关键词: 移动机械手; 鲁棒自适应; 模糊控制; 完整和非完整约束

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Motion/force robust and adaptive trajectory tracking of mobile manipulator

WANG Hong-qi^{1,2}, WANG Qing-lin¹

(1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China. Correspondent: WANG Hong-qi, E-mail: wanghongqi@hpu.edu.cn)

Abstract: Design method of motion/force robust and adaptive controller for uncertain mobile manipulator suffering holonomic and un-holonomic constraints is researched. In view of some problems existing in model reduction with the implicit function theorem when designing the controller of mobile manipulator, a unified form of holonomic and un-holonomic constraints is introduced into system's dynamic model reduction. Based on the reduced model, a steady motion/force robust and adaptive linear parameter fuzzy controller for uncertain mobile manipulator is designed. The theoretical analysis and the simulation result show that the designed controller is simple and effective.

Key words: Mobile manipulator; Robust and adaptive; Fuzzy control; Holonomic and un-holonomic constraints

1 引言

很多学者对机械手等系统的运动/力混合控制进行了研究^[1-6]. 文献[2]研究了非完整约束的移动机器人动力学控制, 提出一种鲁棒自适应运动/力控制方法. [4]分别讨论了完整约束或非完整约束的机械系统的运动/力动力学控制, 在存在参数不确定和外界扰动的情况下, 提出了稳定的鲁棒自适应运动/力控制策略. [5, 6]对同时受到完整和非完整约束的不确定移动机械手, 提出了一种鲁棒自适应运动/力控制策略, 保证系统的运动轨迹收敛到期望的流形, 而且运动约束力有界.

在机器人系统的运动/力混合控制中, 对完整约束的处理是控制器设计的关键之一. 当完整约束的维数小于系统位形空间的维数时, 隐函数定理给出了直接消去冗余变量、只保留系统独立变量的存在性. 文献[4-6]利用隐函数定理对移动机械手的动力

学模型进行降阶, 但在对系统完整约束的变量重新划分时, 不是从全局出发, 而是认为冗余变量只存在于机械手子系统中, 干预了隐函数定理中变量的重组, 这种操作缺乏理论根据. 实际上, 隐函数定理只给出了完整约束中直接消去冗余变量的存在性, 可能找不到冗余变量与独立变量之间的函数, 所以直接消去冗余变量要视具体情况而定. 隐函数定理在控制系统的应用中还存在一些其他的限制^[7]: 1) 用隐函数定理处理完整约束, 需要求解微分-代数方程, 增加了求解难度; 2) 隐函数定理给出的解可能是奇异解或多解; 3) 用隐函数定理处理完整约束时, 应保证变量始终满足完整约束. 如果变量的初始条件不满足完整约束, 或在系统运行过程中由于扰动等原因致使变量不再满足完整约束, 则用隐函数定理会得到错误的结果. 所以有必要研究其他移动机械手动力学的模型降阶和控制方法.

收稿日期: 2009-03-13; 修回日期: 2009-04-24.

作者简介: 王红旗(1973—), 男, 河南周口人, 博士生, 从事非线性系统控制、机器人控制的研究; 王庆林(1963—), 男, 河南林州人, 教授, 博士生导师, 从事非线性系统控制等研究.

本文在移动机械手动力学模型降阶中引入完整和非完整约束的统一形式,克服了用隐函数定理模型降阶的缺点.基于该降阶模型和线性参数模糊逻辑系统,设计了不确定移动机械手的运动/力鲁棒自适应控制器,并进行了仿真验证.

2 模型降阶

设 n 自由度移动机械手由轮式差动驱动移动平台和位于其上的机械手组成,移动平台的广义坐标向量是 $q_v \in R^{n_1}$,机械手的广义坐标向量是 $q_a \in R^{n_2}$,其动力学模型可描述如下:

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = B(q) \ddot{q}_v + J(q)^T \ddot{q}_a + d(q), \quad (1)$$

$$J_n(q_v) \dot{q}_v = 0, \quad (2)$$

$$\Phi(q) = 0 \quad R^l. \quad (3)$$

式中: $q = [q_v^T, q_a^T]^T \in R^n$ 是移动机械手的广义坐标向量; $M(q) \in R^{n \times n}$ 是系统的正定对称惯性矩阵; $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ 是哥氏力矩阵; $G(q) \in R^n$ 是重力项; $B(q) \in R^{n \times m}$ 是系统已知的满秩输入矩阵; $d = [d_v^T, d_a^T]^T$ 是驱动力; $J(q)$ 是移动机械手的约束矩阵, $J(q) = \begin{bmatrix} J_n & 0 \\ J_v & J_a \end{bmatrix}$, $J_n \in R^{k \times n_1}$, k, m_1 是非完整约束矩阵; $J_h = [J_v, J_a] \in R^{l \times n}$, l, m_2 是移动机械手的完整约束矩阵; $\lambda = [\lambda_n^T, \lambda_h^T]^T$, $\lambda_n \in R^k$, $\lambda_h \in R^l$ 分别是与非完整约束和完整约束相应的拉格朗日乘子; $d \in R^n$ 是系统的外界扰动.其中式(2)为非完整约束,它把移动机械手的位形和速度限制在光滑流形 $n = \{ (q_v, \dot{q}_v) / J_n(q_v) \dot{q}_v = 0 \in R^k \}$ 上;式(3)为完整运动约束,它把移动机械手的位形和速度限制在光滑流形 $h = \{ (q, \dot{q}) / \Phi(q) = 0 \in R^l, J_h(q) \dot{q} = 0 \}$ 上.完整约束的维数通常少于广义坐标的维数,所以移动机械手在此光滑流形上的动态完全由其独立的坐标确定.

将式(3)微分得

$$J_h \dot{q} = 0. \quad (4)$$

式(4)与(2)相似,但式(4)与(3)并不是等价变换,只有在满足初始条件 $\Phi(q_0) = 0$ 时它们才是等价的.定义^[7]

$$\dot{\Phi}(q) + \lambda \Phi(q) = 0, \quad \lambda > 0, \quad (5)$$

显然 $\lim_{t \rightarrow \infty} \Phi(q) = 0$.用式(5)代替(3),不论系统初始条件是否满足 $\Phi(q_0) = 0$,最终都不会影响式(4)与(3)的等价性,这也是完整和非完整约束可以统一表达的原因.

将式(2)与(5)合并,整理得

$$J \dot{q} = a(t). \quad (6)$$

其中

$$J(q) = \begin{bmatrix} J_n & 0 \\ J_v & J_a \end{bmatrix}, \quad a(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \phi(q) \end{bmatrix}.$$

由式(6),存在一个光滑函数 $\dot{\phi}(q) \in R^{(n_1+n_2-k)}$,使得

$$\dot{q} = L(q) \dot{\phi}(q) + v(q), \quad (7)$$

其中 $v(q)$ 是式(6)的特解. $L \in R^{(n_1+n_2) \times (n_1+n_2-k)}$ 满足

$$J(q)L(q) = 0. \quad (8)$$

将式(7)及其微分代入式(1),得

$$ML \dot{\phi} + (M\dot{L} + CL) \dot{\phi} + (M\dot{v} + Cv + G) = B + J^T \lambda + d, \quad (9)$$

两边同乘以 $L^T(q)$,考虑式(8)得

$$L^T M L \ddot{\phi} + L^T (M\dot{L} + CL) \dot{\phi} + L^T (M\dot{v} + Cv + G) = L^T B + L^T d. \quad (10)$$

定义

$$\tilde{M} = ML, \quad \tilde{C} = (M\dot{L} + CL),$$

$$\tilde{G} = (M\dot{v} + Cv + G), \quad \tilde{M}_l = L^T ML,$$

$$\tilde{C}_l = L^T (M\dot{L} + CL), \quad \tilde{d}_l = L^T d,$$

$$\tilde{G}_l = L^T (M\dot{v} + Cv + G), \quad \tilde{B}_l = L^T B.$$

式(9)和(10)可分别写成

$$\tilde{M} \ddot{\phi} + \tilde{C} \dot{\phi} + \tilde{G} = B + J^T \lambda + d, \quad (11)$$

$$\tilde{M}_l \ddot{\phi} + \tilde{C}_l \dot{\phi} + \tilde{G}_l = \tilde{B}_l + \tilde{d}_l. \quad (12)$$

3 模糊控制器设计

为设计鲁棒稳定的控制器,需要做一些合理的假设:

- 假设 1 移动机械手的系数矩阵都是有界的;
- 假设 2 外界扰动项 $d(q)$ 有界;
- 假设 3 期望的广义坐标向量 q_d 连续有界,并具有连续可微的二阶导数;
- 假设 4 期望的约束力 λ 有界.

设 $R^{(n_1+n_2-k)}$ 的期望值为 $\dot{\phi}_d \in R^{(n_1+n_2-k)}$.跟踪误差 $e = \dot{\phi} - \dot{\phi}_d$,约束力误差 $e_\lambda = \lambda - \lambda_d$.定义滤波误差向量分别为 $\dot{r} = \dot{\phi}_d - Ke$, $s = \dot{r} - \dot{r} = \dot{e} + Ke$, $c = \lambda_d - Ke - K_0 \int_0^t e d\tau$.设模糊控制器的输入变量和多项式矩阵分别为

$$x = (\dot{r}^T, r^T)^T,$$

$$H(x) = \tilde{M}_l \ddot{r} + \tilde{C}_l (s + \dot{r}) + \tilde{G}_l - \frac{1}{2} \tilde{M}_l s. \quad (13)$$

令 $\bar{H}(x) = H(x) - \tilde{d}_l$,因为系统存在参数和外界扰动的不确定性,所以 $\bar{H}(x)$ 是不确定的.构造一个线性参数模糊逻辑系统 $H(x, \hat{\Lambda})$ 逼近 $H(x)$,即

$$\bar{H}(x) = H^*(x, \hat{\Lambda}) + \epsilon. \quad (14)$$

其中: $H^*(x, \hat{\Lambda})$ 是 $\bar{H}(x)$ 的最佳模糊逼近; $\hat{\Lambda}$ 是模糊逻辑系统的最佳逼近参数,有

$$\hat{\Lambda} = \arg \min_{\Lambda} (\max_{x \in U} \|\bar{H}(x) - H(x, \hat{\Lambda})\|),$$

$$= \{ \wedge / \wedge^T \quad M^{\wedge}, M^{\wedge} > 0 \}, U \subset R^{2(n_1+n_2-k)};$$

是模糊逻辑系统的最佳逼近误差, 一般假设最佳逼近误差有界. 本文采用单值模糊化、乘机推理和中心平均解模糊逻辑系统^[8-12]

$$h(x, \wedge) = \frac{\sum_{j=1}^M \left(\prod_{i=1}^N \mu_{F_i^j}(x_i, c_{ji}, \tilde{j}_i) \right)}{\sum_{j=1}^M \left(\prod_{i=1}^N \mu_{F_i^j}(x_i, c_{ji}, \tilde{j}_i) \right)}. \quad (15)$$

其中: M 和 N 分别是模糊系统的规则数和输入的模糊变量数; $\mu_{F_i^j}(x_i, c_{ji}, \tilde{j}_i)$ 是模糊集 F_i^j 的高斯隶属度函数, 有

$$\mu_{F_i^j}(x_i, c_{ji}, \tilde{j}_i) = \exp\left[-\left(\frac{x_i - c_{ji}}{\tilde{j}_i}\right)^2\right], \quad (16)$$

c_{ji}, \tilde{j}_i, j 分别是高斯隶属度函数的实值参数, 对线性参数模糊逻辑系统而言, 只有模糊后件的参数 j 在线可调, 模糊前件的参数 c_{ji} 和 \tilde{j}_i 是预先确定的. 对所研究的移动机械手, $\tilde{M}_l \in R^{(n_1+n_2-k)}$, 所以模糊逻辑系统的输出 $\mathbf{H}(x, \wedge) \in R^{(n_1+n_2-k)}$.

定义线性化参数模糊逻辑系统为

$$\mathbf{H}(x, \wedge) = \begin{bmatrix} h_1(x, \wedge_1) \\ \dots \\ h_{n_1+n_2-k}(x, \wedge_{n_1+n_2-k}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1^T(x) \wedge_1 \\ \dots \\ y_{n_1+n_2-k}^T(x) \wedge_{n_1+n_2-k} \end{bmatrix} = \mathbf{Y}^T(x) \wedge. \quad (17)$$

其中: $\mathbf{Y}(x)$ 称为模糊基函数矩阵; \wedge 称为模糊逻辑系统的可调参数向量. 通过建立自适应律在线实时调整参数 \wedge , 可使线性参数模糊逻辑系统 $\mathbf{H}(x, \wedge)$ 逐步逼近移动机械手中的不确定项 $\bar{\mathbf{H}}(x)$.

定义鲁棒模糊控制器

$$\mathbf{B} = \mathbf{L}^{\#} [-\mathbf{K}s + \mathbf{H}(x, \wedge) - \mathbf{K} \operatorname{sgn}(s)] - \mathbf{J}^T c, \quad (18)$$

参数自适应律

$$\dot{\wedge} = \begin{cases} -\mathbf{Y}^T(x) s, & \|\wedge\|^2 < M^{\wedge}, \text{ 或 } \|\wedge\|^2 = M^{\wedge} \\ \text{且 } [Y(x) s]^T \wedge > 0; & \\ -\mathbf{Y}^T(x) s + \frac{[Y(x) s]^T \wedge}{\|\wedge\|^2}, & \\ \|\wedge\|^2 = M^{\wedge} \text{ 且 } [Y(x) s]^T \wedge < 0. & \end{cases} \quad (19)$$

其中: $\gamma > 0, K > 0, \min(K) > 0$, $\min(\cdot)$ 是矩阵的最小特征值, $\|\cdot\|$ 是向量的无穷范数.

定理 1 受完整和非完整约束的移动机械手(式(1) ~ (3)), 考虑参数和外界扰动等不确定性, 在满足假设 1 ~ 假设 4 的条件下, 对于期望的轨迹 q_d 和约束力 d_d , 定义鲁棒控制器(18)和参数自适应律(19), 有下面的结论:

- 1) 广义坐标向量 q 及其微分 \dot{q} 渐近收敛于期望的轨迹 q_d 和速度 \dot{q}_d ;
- 2) 约束力误差 e 有界, 并通过调节常数矩阵 K 和 K_s , 可使 e 接近于 0;
- 3) 模糊逻辑系统的参数 \wedge 有界.

证明 定义 Lyapunov 候选函数

$$V = \frac{1}{2} s^T \tilde{M}_l s + \frac{1}{2} \tilde{\wedge}^T \Gamma^{-1} \tilde{\wedge}. \quad (20)$$

其中: $\tilde{\wedge} = \wedge - \wedge^*$, $\Gamma > 0$. 将式(20)微分得

$$\dot{V} = \frac{1}{2} s^T \dot{\tilde{M}}_l s + s^T \tilde{M}_l \dot{s} - \tilde{\wedge}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\wedge}}. \quad (21)$$

由式(12)得

$$\dot{\tilde{M}}_l s = \bar{B}_l - [\tilde{M}_l \ddot{r} + \bar{C}_l (s + \dot{r}) + \bar{G}_l] + \bar{d}_l, \quad (22)$$

代入式(21), 考虑式(13)和(14)有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T [\bar{B}_l - [\mathbf{H}(x) - \bar{d}_l]] - \tilde{\wedge}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\wedge}} = \\ &= s^T [\bar{B}_l - \bar{\mathbf{H}}(x)] - \tilde{\wedge}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\wedge}} = \\ &= s^T [\bar{B}_l - \mathbf{H}^*(x, \dot{x}) - \bar{J}] - \tilde{\wedge}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\wedge}}. \end{aligned} \quad (23)$$

将式(18)代入(23), 得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -s^T \mathbf{K} s - \mathbf{K}_s \|\dot{s}\| - s^T \tilde{\wedge}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\wedge}} \\ &= -\min(K) \|s\|^2 - [\min(K) - \gamma] \|s\| \\ &\quad - [s^T \mathbf{Y}^T(x) + \tilde{\wedge}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\wedge}}]. \end{aligned} \quad (24)$$

由 $\min(K) > 0$, 并对式(19)的两种情况分别讨论如下:

1) $\|\wedge\|^2 < M^{\wedge}$ 或 $\|\wedge\|^2 = M^{\wedge}$ 且 $[Y(x) s]^T \wedge > 0$ 时, 由式(24)得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\min(K) \|s\|^2 - [\min(K) - \gamma] \|s\| \\ &= -\min(K) \|s\|^2 - 0; \end{aligned} \quad (25)$$

2) $\|\wedge\|^2 = M^{\wedge}$ 且 $[Y(x) s]^T \wedge < 0$ 时, 由式(24)得

$$\dot{V} = -\min(K) \|s\|^2 - \frac{[Y(x) s]^T \wedge}{\|\wedge\|^2} \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\wedge}}$$

$$\dot{V} = \min(K) s^2 + \frac{[Y(x) s]^T \Lambda^T (\Lambda - \dot{\Lambda})}{\Lambda^2} \quad (26)$$

考虑不等式 $-x^T x \pm x^T y - y^T y/4$, 则式(26)可化为

$$\dot{V} = \min(K) s^2 - \frac{\dot{\Lambda}^2}{4} - \min(K) s^2 \leq 0 \quad (27)$$

移动机械手的滤波误差 s 和模糊系统参数误差 $\tilde{\Lambda}$ 都是有界的, 即 $s \leq L, \tilde{\Lambda} \leq L$. 另外, 由式(25)或(27)可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t s^2 d\tau \leq \frac{[V(0) - V(\infty)]}{\min(K)}$$

故 $s \leq L_2$. 因 $s = \dot{e} + Ke$, $e = -\dot{e}/K$, 所以 $e \leq L$, $\dot{e} \leq L$ 且 $e \leq L_2, \dot{e} \leq L_2$. 由假设1~假设3和 r 的定义知, $\dot{r}, \ddot{r}, \dot{r}, \ddot{r}$ 都是有界的, 式(22)的右边有界, 所以 $\dot{s} \leq L$, 进而知 $\ddot{e} \leq L$. 由Barbalat定理可推知 $\lim_{t \rightarrow \infty} e = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e} = 0$, 所以有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \ddot{e} = \ddot{d}, \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e} = \dot{d}, \lim_{t \rightarrow \infty} q = q_d, \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{q} = \dot{q}_d$.

由 $\tilde{\Lambda} \leq L$, 可知 Λ , 模糊控制器参数有界.

由式(11)得

$$J^T \dot{e} = -B \dot{e} + \tilde{M} \ddot{e} + \tilde{C} \dot{e} + \tilde{G} e - d \quad (28)$$

将式(18)代入(28)得

$$J^T (-\dot{e}) = -L^{\#} [-Ks + H(x, \Lambda) - K \operatorname{sgn}(s)] + \tilde{M} \ddot{e} + \tilde{C} \dot{e} + \tilde{G} e - d$$

即

$$J^T (K\dot{e} + K_0 e + e) = \tilde{M} \ddot{e} + \tilde{C} \dot{e} + \tilde{G} e - d - L^{\#} [-Ks + H(x, \Lambda) - K \operatorname{sgn}(s)] \quad (29)$$

由前面推证的结果和假设1~假设4知, 式(29)的右边是有界的. 设

$$W = J^{\#} \{-L^{\#} [-Ks + H(x, \Lambda) - K \operatorname{sgn}(s)] + \tilde{M} \ddot{e} + \tilde{C} \dot{e} + \tilde{G} e - d\}$$

则

$$(K\dot{e} + K_0 e + e) = W \quad (30)$$

其中 $J^{\#} = J(J^T J)^{-1}$ 是 J^T 的广义逆. 显然, 约束力误差 e 有界, 通过合适地选择常数矩阵 K 和 K_0 , 可使约束力误差 e 接近于0.

4 仿真结果

仿真的非完整轮式差动驱动移动机械手如图1所示, $m_1 = 5, m_2 = 2$. 移动平台的非完整约束为

$$J_n(q_v) = \begin{bmatrix} \sin \theta_1 & -\cos \theta_1 & 0 & 0 & 0 \\ \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 & \frac{-r}{2} & \frac{-r}{2} \end{bmatrix}$$

完整约束为 $\dot{q}_v = k(r - l_1)$. 设机械手的完整约束为

$$\phi(q) = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2 - r^2$$

则式(6)和(7)中的约束力矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} \sin \theta_1 & -\cos \theta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 & \frac{-r}{2} & \frac{-r}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{r}{2d} & \frac{-r}{2d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2l_1 l_2 \sin \theta_2 \end{bmatrix}$$

核矩阵、特解和多项式矩阵分别为

$$L = \begin{bmatrix} 0 & \frac{r}{2} \cos \theta_1 & \frac{r}{2} \cos \theta_1 \\ 0 & \frac{r}{2} \sin \theta_1 & \frac{r}{2} \sin \theta_1 \\ 0 & \frac{r}{2d} & \frac{-r}{2d} \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$v = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{5[2d + r(l_1 - r)]}{2d} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{5(l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2 - r^2) \operatorname{csc} \theta_2}{2l_1 l_2} \end{bmatrix}$$

$$a(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -5 \left[-\frac{r}{2d} (r - l_1) \right] \\ -5(l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2 - r^2) \end{bmatrix}$$

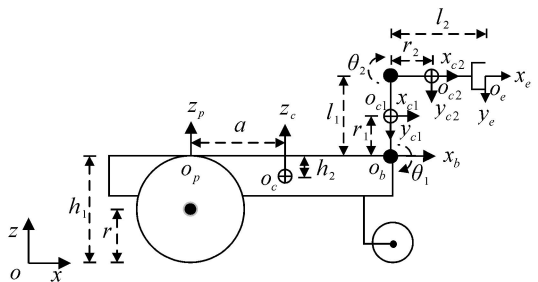


图1 移动机械手模型

模糊系统的结构参数取 $N = 4, M = 81, K = 3$. 高斯隶属度函数的参数 $c_{ji}, j_i (i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, M)$ 在 $[-50, 50]$ 中平均选取, $M_s = 100$.

模糊控制器中的参数矩阵 K 和 K 分别取元素为 50 和 0.025 的正定对角阵, 其中 K 对角元素的选择不能过大, 否则将减缓系统仿真的速度. 外界扰动用随机信号模拟, 信号强度为 2 倍; $\alpha = 0.5$, $K = 500$, $K = 15$. 移动机械手广义坐标的初值为 $[0, 0, 2, 2, 0, 0, 2.4189]$, 期望轨迹为

$$\begin{aligned} x &= 2 \sin(2t + \pi/3), \quad y = 2 \sin(2t - \pi/3), \\ &= \frac{r}{2d}(L - R), \quad L = 4 \sin(2t + \pi/2), \\ R &= 4 \sin(2t - \pi/2), \quad \dot{x}_1 = 2 \sin(2t + \pi/2), \\ \dot{x}_2 &= 2.4189. \end{aligned}$$

系统仿真的部分结果如图 2 ~ 图 4 所示. 图 2 中曲线 ① ~ ⑤ 分别表示移动机械手的广义坐标 $y, \dot{x}_2, x, \dot{x}_1, \dot{y}$; 图 3 中曲线 ① ~ ⑤ 分别表示广义坐标的微分 $\dot{y}, \dot{x}_2, \dot{x}, \dot{x}_1, \dot{y}$; 图 4 中曲线 ① ~ ④ 分别表示约束力 $\lambda_1, \lambda_2, h_1, h_2$. 仿真结果表明, 对给定的初始状态、外界扰动和期望的轨迹, 移动机械手所有的位形及其速度都能渐近跟踪; 有界并能迅速地逼近期

望值. 移动机械手的约束力所设计的移动机械手鲁棒自适应模糊控制器是有效的.

5 结 论

移动机械手采用完整和非完整约束统一表达的模型降阶方式, 能克服用隐函数定理进行系统动力学模型降阶的缺点. 基于该降阶模型设计的运动 / 力鲁棒自适应模糊控制器, 结构简单, 鲁棒性和适应能力较强.

参考文献(References)

- [1] Chur'yi S, Stepanenko Y. Robust motion/force control of mechanical systems with classical nonholonomic constraints [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 39(3) : 609-614.
- [2] Oya M, Chur'yi S, Katoh R. Robust adaptive motion/force tracking control of uncertain nonholonomic mechanical systems [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2003, 19(1) : 175-181.
- [3] Li Z J, Yang C G, Luo J, et al. Robust motion/force control of nonholonomic mobile manipulators using hybrid joints [J]. Advanced Robotics, 2007, 21(11) : 1231-1252.
- [4] Wang Z P, Ge S S, Lee T H. Robust motion/force control of uncertain holonomic/ nonholonomic mechanical systems [J]. IEEE-ASME Trans on Mechatronics, 2004, 9(1) : 118-123.
- [5] Li Z J, Ge S S, Ming A. Adaptive robust motion/force control of holonomic-constrained nonholonomic mobile manipulators [J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2007, 37(3) : 607-617.
- [6] Xie Z X, Ming A G, Li Z J. Adaptive robust trajectory and force tracking control of constrained mobile manipulators [C]. Int Conf on Mechatronics and Automation. Harbin, 2007 : 1351-1355.
- [7] Xiaoping Y, Sarkar N. Unified formulation of robotic systems with holonomic and nonholonomic constraints [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1998, 14(4) : 640-650.
- [8] Wang L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems [J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 1993, 1(2) : 146-155.
- [9] Castro L J. Fuzzy logic controllers are universal approximators [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1995, 25(4) : 629-635.
- [10] T Das, N Kar I. Design and implementation of an adaptive fuzzy logic-based controller for wheeled mobile robots [J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2006, 14(3) : 501-510.

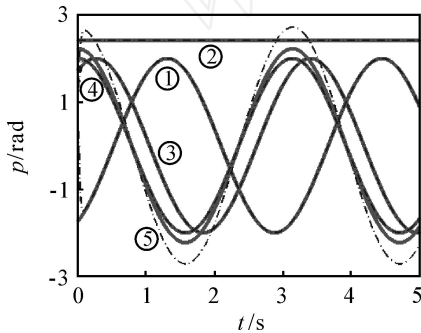


图 2 位置跟踪

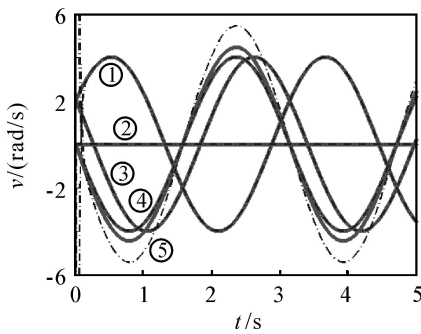


图 3 速度跟踪

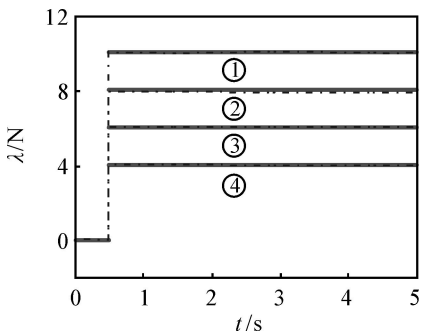


图 4 约束力跟踪

- object classification[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(4): 578-593.
- [5] Pedrycz W, Amato A, Lecce V D, et al. Fuzzy clustering with partial supervision in organization and classification of digital images[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2008, 16(4): 1008-1026.
- [6] 孙广玲, 唐降龙. 基于分层高斯混合模型的半监督学习算法[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(1): 156-161. (Sun G L, Tang X L. A semi-supervised learning algorithm based on a hierarchical GMM [J]. J of Computer Research and Development, 2004, 41(1): 156-161.)
- [7] Wagstaff K, Cardie C. Clustering with Instance-level Constraints[C]. Proc of the 17th Int Conf on Machine Learning. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 2000: 1103-1110.
- [8] Frigui H, Krishnapuram R. Clustering by competitive agglomeration[J]. Pattern Recognition, 1997, 30(7): 1109-1119.
- [9] Bezdek J C, Ehrlich R, Full W. FCM: The fuzzy C-means clustering algorithm [J]. Computer & Geoscience, 1984, 10(2/3): 191-203.
- [10] Grira N, Crucianu M, Boujema N. Fuzzy clustering with pairwise constraints for knowledge-driven image categorization[J]. IEE Proc—Vision, Image and Signal Processing, 2006, 153(3): 299-304.
- [11] Lange T, Law M H C, Jain A K, et al. Learning with constrained and unlabelled data [C]. IEEE Computer Society Conf on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC: IEEE Computer Society, 2005, 1: 731-738.
- [12] Blake C, Keogh E, Merz C J. UCI repository of machine learning database [EB/OL]. (2008-11-16). <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets.html>.

(上接第 109 页)

- [11] Yeong-chan C, Bor-sen C. Robust tracking designs for both holonomic and nonholonomic constrained mechanical systems: Adaptive fuzzy approach [J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2000, 8(1): 46-66.
- [12] Yonggon L, Zak S H. Uniformly ultimately bounded fuzzy adaptive tracking controllers for uncertain systems[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2004, 12(6): 797-811.

(上接第 114 页)

- [4] 蔡元龙. 模式识别 [M]. 西安: 西安电子科技大学, 1992. (Cai Y L. Mode recognition [M]. Xi'an: Xidian University, 1992.)
- [5] 傅惠民. 模糊回归分析和数据融合方法[J]. 中国安全科学学报, 2002, 12(6): 73-76. (Fu H M. Fuzzy regression analysis and data fusion [J]. J of China Safety Science, 2002, 12(6): 73-76.)
- [6] 谢希权, 谢邦荣, 李伟仁. 机载雷达与红外搜索跟踪装置的航迹融合研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(4): 20-22. (Xie X Q, Xie B R, Li W R. Study on track fusion for airborne radar and infrared searching and track system [J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(4): 20-22.)
- [7] 傅惠民, 张应福, 张少波. 解非线性方程组的一元化方法[J]. 机械强度, 1999, 21(3): 205-207. (Fu H M, Zhang Y F, Zhang S B. Univariate method for solving nonlinear simultaneous equations [J]. J of Mechanical Strength, 1999, 21(3): 205-207.)
- [8] Rong Li R, Vesselin P Jilkov. Survey of maneuvering target tracking, Part : Dynamic models [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(4): 1333-1364.