

二阶动态滑模控制在移动机械臂输出跟踪中的应用

吴玉香, 胡跃明

(华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510641)

摘要: 针对移动机械臂的输出跟踪问题, 结合高阶滑模控制和动态滑模控制的设计思想为其设计了一种二阶动态滑模控制器. 首先给出了包括驱动电机动态特性的移动机械臂的简化动态模型, 然后通过微分同胚和输入变换将其分解为四个低阶子系统, 并给出了其输出跟踪的二阶动态滑模控制器的设计方法. 仿真结果表明, 所设计的二阶动态滑模控制器不仅能很好地跟踪给定轨迹, 而且能有效地削弱滑模控制系统的抖振.

关键词: 移动机械臂; 二阶动态滑模控制; 跟踪控制; 电机动态

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Second order dynamical sliding mode control and its application to output tracking of mobile manipulators

WU Yu-xiang, HU Yue-ming

(College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510641, China)

Abstract: Combining high-order sliding mode control with dynamical sliding mode control, a second order dynamical sliding mode controller is proposed for output tracking problem of mobile manipulators. Firstly, the reduced dynamic model including motor dynamics is developed for mobile manipulators. The system is then decomposed into four lower-dimensional subsystems by applying diffeomorphism and nonlinear input transformation to the reduced model. The design of the second order dynamical sliding mode controller is then addressed for the output tracking of mobile manipulators. Finally, the results of numerical simulation verify that the second order dynamical sliding mode controller can not only track the given trajectory but also considerably reduce the chattering of sliding mode control systems.

Key words: mobile manipulators; second order dynamical sliding mode control; tracking control; motor dynamics

1 引言 (Introduction)

移动机械臂由移动机器人和装在移动机器人上的机械臂组成. 它既具有移动机器人的可移动性又具有机械臂的操作灵活性, 在国防、工业、农业、家庭及医疗等行业中具有很高的应用价值, 近年来已引起国际学术界和工业界的高度重视. Yamamoto 等^[1]研究了遭受非完整约束的两连杆平面移动机械臂, 基于首选工作区域的概念发展了一种协调控制算法; 他们也研究了在执行任务时移动基和机械臂的动态交互影响^[2]. Sheng liu 等^[3]为遭受运动学约束移动机械臂的运动控制发展了鲁棒减震控制 (RDC) 算法. Wenjie Dong 等^[4]基于定义的动态误差方程和扩展的 Barbalat 引理, 提出了一种全局跟踪控制器. 但在他们的研究中都没有考虑驱动电机的动态特性. 然而, 在许多工业应用中, 电机动态将

会影响系统的控制性能, 特别是在高速高精度的控制系统中. 为提高系统性能, 控制设计中必须考虑电机动态的影响^[5].

轮式移动机械臂是典型的高度非线性的非完整动力学系统, 它不能用光滑或连续的时不变状态反馈来实现其渐近稳定或跟踪, 这便使得不连续的滑模控制方法更具吸引力^[6,7]. 近十多年来, 滑模控制受到了国内外控制界的普遍重视, 主要是滑模控制不仅算法简单, 而且能够使动态系统以极高的精度保持在给定的约束中, 尤其是它对扰动和参数变化的鲁棒性以及进入滑动模运动后的完全自适应性, 使得滑模控制广泛应用于线性系统和非线性系统的鲁棒镇定中^[8]. 但滑模控制也有显著的缺陷, 那就是“抖振”问题. 传统滑模控制方法中切换面的选取一般只依赖于系统状态, 而与系统输入无关.

这样,到达律中的不连续项会直接转移到控制中,使系统在不同的控制逻辑间来回切换,从而引起系统抖振.而动态滑模控制^[9]和高阶滑模控制^[10]在选择切换面时不仅依赖于系统状态,而且与系统输入甚至输入的一阶或高阶导数有关,因而到达律中不连续项的影响可有相当部分转移到控制的一阶或高阶导数项中去,这便大大削弱了滑模控制系统的抖振.

本文针对包含驱动电机动态特性的移动机械臂,就其输出跟踪问题给出了二阶动态滑模控制器的设计方法,并用仿真证明了它的正确有效性.

2 包括电机动态的移动机械臂动态模型 (Dynamic model including motor dynamics of mobile manipulators)

考虑由非完整移动平台和完整二连杆机械臂构成的移动机械臂,其中移动平台由两个独立驱动的后轮和一个提供平衡的从动前轮组成,在移动平台的质心位置装配一个二连杆机械臂,其绞点位置各由一台马达驱动,连杆1可绕 z 轴转动,连杆2可上下转动,其结构如图1所示,由于移动平台由两台马达驱动,其轮子与地面的约束为非完整约束(轮子只滚动不滑动),其包括驱动电机动态特性的移动机械臂的简化动态方程可表示为:

$$\dot{q} = S(q)v, \quad (1)$$

$$\bar{M}(q)\dot{v} + \bar{V}(q, \dot{q})v + \bar{G}(q) = \bar{B}(q)\tau, \quad (2)$$

$$L \frac{di}{dt} + ri + k_e \omega = u. \quad (3)$$

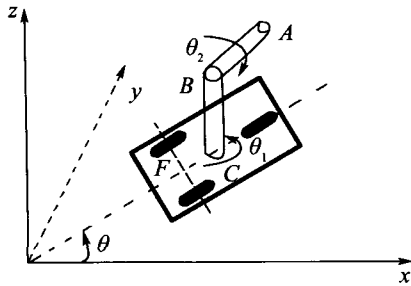


图1 二连杆移动机械臂

Fig. 1 Mobile manipulators with two links

式(1)(2)为移动机械臂的运动学方程和动力学方程^[11],式(3)为驱动电机的动态方程.其中: $q = [x_c \ y_c \ \varphi \ \theta_1 \ \theta_2]^T$, $\bar{M} = S^T M(q) S$, $\bar{V} = S^T (M\dot{S} + VS)$, $\bar{G} = S^T G$, $\bar{B} = S^T B = I$, $M(q)$ 为惯性矩阵, $V(q, \dot{q})$ 为向心力和哥氏力矩阵, $G(q)$ 为万有引力矢量, $B(q)$ 为输入转换矩阵, τ 为输入转矩矢量; L 为电枢回路电感, r 为电枢回路电阻, k_e 为电

动机反电势常数, ω , u , i 分别为电机的角速度、输入端电压和电枢电流; $v = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4]^T = [\dot{\theta}_r \ \dot{\theta}_l \ \dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2]^T$, $S(q) = [\frac{l}{2}\cos\varphi - \frac{l}{R}\sin\varphi \ \frac{l}{2}\cos\varphi + \frac{l}{R}\sin\varphi \ 0 \ 0, \ \frac{l}{2}\sin\varphi + \frac{l}{R}d\cos\varphi \ \frac{l}{2}\sin\varphi - \frac{l}{R}d\cos\varphi \ 0 \ 0, \ \frac{l}{R} - \frac{l}{R} \ 0 \ 0, \ 0 \ 0 \ 1 \ 0, 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$,其中, l 为轮子半径, R 为两后轮之间的距离, d 为两后轮的中点位置 p 与平台质心位置 c 之间的距离, φ 为机器人平台方向.由于 $S(q)$ 为非奇异阵,所以式(2)具有下列属性:1) \bar{M} 是对称正定矩阵;2) $\bar{M} - 2\bar{V}$ 为斜对称矩阵.

假设齿轮减速装置的减速比为 β ,电机力矩常数为 k_T ,将移动机械臂动态方程中的驱动力矩 τ_i 和角速度 v_i 折合到电机轴上,则有

$$\frac{L_i}{\beta_i k_{T_i}} \dot{\tau}_i + \frac{r_i}{\beta_i k_{T_i}} \tau_i + k_{e_i} \beta_i v_i = u_i. \quad (4)$$

不失一般性,假设移动平台左右轮驱动电机的参数是一样的,用 $\beta_1, k_{T_1}, r_1, k_{e_1}, L_1$ 表示;连杆1,2的驱动电机参数是一样的,用 $\beta_2, k_{T_2}, r_2, k_{e_2}, L_2$ 表示.

结合式(1)(2)和式(5),可得以电机端电压 u 为控制输入的移动机械臂的动力学模型

$$\begin{cases} \dot{q} = S(q)v, \\ \bar{M}(q)\dot{v} + \bar{V}(q, \dot{q})v + \bar{G}(q) = \tau, \\ \dot{\tau} = H_1 u - H_2 \tau - H_3 v. \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$H_1 = \text{diag}(\beta_1 k_{T_1}/L_1, \beta_1 k_{T_1}/L_1, \beta_2 k_{T_2}/L_2, \beta_2 k_{T_2}/L_2),$$

$$H_2 = \text{diag}(r_1/L_1, r_1/L_1, r_2/L_2, r_2/L_2),$$

$$u = [u_1, u_2, u_3, u_4]^T,$$

$$H_3 = \text{diag}(\beta_1^2 k_{T_1} k_{e_1}/L_1, \beta_1^2 k_{T_1} k_{e_1}/L_1, \beta_2^2 k_{T_2} k_{e_2}/L_2, \beta_2^2 k_{T_2} k_{e_2}/L_2).$$

3 MIMO 系统的高阶动态滑模控制器设计 (Design of high-order dynamical SMC for MIMO system)

高阶动态滑模控制器的设计与传统滑模控制器的设计过程是一样的,一般分两步.第1步,选择适当的滑动流形,以使系统所产生的滑模运动具有期望的动态特性;第2步,选择适当的滑模控制器,以使系统能在有限时间内到达滑动流形.

考虑如下的MIMO系统普通控制器规范形式:

$$\begin{cases} \dot{\sigma}_1 = \sigma_2, \sigma = \sigma_1, \\ \dot{\sigma}_2 = \sigma_3, \\ \vdots \\ \dot{\sigma}_p = \varphi_0(\sigma_1, \dots, \sigma_p, \hat{u}, t), \\ y = \sigma_1. \end{cases} \quad (6)$$

其中: $\hat{u} = (u, \dot{u}, \dots, u^{(\alpha)})$, α 为正整数, 且与系统的相对度 γ 有关, 即 $\alpha = n - \gamma$. 从这里可知, α 与系统零动态的维数一致.

这里假设方程(6) 已为误差动态方程; 选取 σ 为切换函数, p 阶的高阶滑模控制的切换函数取为 σ 及其各阶导数的线性组合

$$S = \sigma_p + m_{p-1}\sigma_{p-1} + \dots + m_2\sigma_2 + m_1\sigma_1. \quad (7)$$

其中 $m_i (i = 1, 2, \dots, p-1)$ 为使下列 $(p-1)$ 阶动态系统具有期望渐近动态特性的常数

$$\sigma_1^{p-1} + m_{p-1}\sigma_1^{p-2} + \dots + m_2\dot{\sigma}_1 + m_1\sigma_1 = 0. \quad (8)$$

一旦系统进入滑模运动, 便有 $S = 0$, 故有 $\sigma = 0, \dot{\sigma} = 0, \dots, \sigma^{p-1} = 0$ 也即实现了高阶滑模运动. 同时, 切换函数 σ 即系统选的滑模运动由式(8) 描述, 所以只要 m_i 选取适当, 系统就会具有期望的动态特性.

其次, 考虑高阶滑模控制律的选取问题. 为使系统从任意初始状态出发到达 S 的时间是有限的, 且为全局到达, 选取到达律为

$$\dot{S} = -WS - K\text{sgn}S, \quad W = \text{diag}(w_i),$$

$$k = \text{diag}(k_i), \quad w_i \geq 0, \quad k_i > 0. \quad (9)$$

结合式(9) 和式(7), 并经简单的代数运算, 可得下面的高阶隐式滑模控制器:

$$\begin{aligned} & \varphi_0(\sigma_1, \dots, \sigma_p, \hat{u}, t) = \\ & -m_1\sigma_2 - m_2\sigma_3 - \dots - m_{p-1}\sigma_p - WS - K\text{sgn}S. \end{aligned} \quad (10)$$

只要上述方程有解, 由以上参数选取可知, 就能使 S 在有限时间内趋于零, 从而保证系统实现期望的滑模运动. 同时, 由式(10) 可知, 该控制器同时实现了高阶滑模控制和动态滑模控制, 即实现了高阶动态滑模控制.

4 移动机械臂输出跟踪的二阶动态滑模控制器设计 (Design of second order dynamical SMC for output tracking problem of mobile manipulators)

首先通过微分同胚和输入变换使系统实现输入/输出线性化. 由式(5) 可得系统的状态空间描述为

$$\begin{cases} \dot{q} = S(q)v, \\ \dot{v} = \bar{M}^{-1}(q)(\tau - \bar{V}(q, \dot{q})v - \bar{G}(q)), \\ \dot{\tau} = H_1u - H_2\tau - H_3v. \end{cases} \quad (11)$$

选取系统的输出为

$$Y = [y_1 \quad y_2 \quad y_3 \quad y_4]^T = [x_c \quad y_c \quad \theta_1 \quad \theta_2]^T. \quad (12)$$

上式两边对时间求导得

$$\dot{Y} = B_1(\varphi)v, \quad (13)$$

$$\dot{Y} = B_1(\varphi)\dot{v} + B_2(\varphi)\dot{\varphi}v, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \ddot{Y} &= B_1(\varphi)\ddot{v} + (\dot{B}_1(\varphi) + B_2(\varphi)\dot{\varphi})\dot{v} + \\ & (\dot{B}_2(\varphi)\dot{\varphi} + B_2(\varphi)\ddot{\varphi})v = \\ & B_1\bar{M}^{-1}[H_1u - \bar{M}\dot{v} - \bar{V}v - \bar{G}] + P. \end{aligned} \quad (15)$$

其中:

$$B_1(\varphi) = \begin{bmatrix} \frac{l}{2}\cos\varphi - \frac{l}{R}d\sin\varphi & \frac{l}{2}\cos\varphi + \frac{l}{R}d\sin\varphi & 0 & 0 \\ \frac{l}{2}\sin\varphi + \frac{l}{R}d\cos\varphi & \frac{l}{2}\sin\varphi - \frac{l}{R}d\cos\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_2(\varphi) = \begin{bmatrix} -\frac{l}{2}\sin\varphi - \frac{l}{R}d\cos\varphi & -\frac{l}{2}\sin\varphi + \frac{l}{R}d\cos\varphi & 0 & 0 \\ \frac{l}{2}\cos\varphi - \frac{l}{R}d\sin\varphi & \frac{l}{2}\cos\varphi + \frac{l}{R}d\sin\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\dot{\varphi} = \frac{l}{R}(v_1 - v_2), \quad \bar{M} = H_2\bar{M} + \bar{M} + \bar{V},$$

$$\bar{V} = H_2\bar{V} + \bar{V} + H_3, \quad \bar{G} = H_2\bar{G} + \bar{G},$$

$$P = (\dot{B}_1 + B_2\dot{\varphi})\dot{v} + (\dot{B}_2\dot{\varphi} + B_2\ddot{\varphi})v.$$

取状态变化 $Z = T(q, v)$ 和非线性反馈

$$Z_1 = Y, \quad Z_2 = \dot{Y}, \quad Z_3 = \ddot{Y}, \quad z_4 = \varphi, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (16)$$

$$u = H_1^{-1}\bar{M}(q)B_1^{-1}(\varphi)(v - P) + H_1^{-1}(\bar{M}\dot{v} + \bar{V}v + \bar{G}). \quad (17)$$

容易验证 $Z = T(q, v)$ 在整个状态空间内是微分同胚. v 为辅助控制输入, 此时系统可分解为如下 4 个子系统

1) 线性化部分

$$\begin{cases} \dot{Z}_1 = Z_2, \\ \dot{Z}_2 = Z_3, \\ \dot{Z}_3 = v. \end{cases} \quad (18)$$

它是 4 个解耦的 SISO 子系统.

2) 未线性化部分

$$z_4 = \frac{\partial \varphi}{\partial q} S(q)v. \quad (19)$$

令 $z_{ij} = 0 (i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2)$, 可得其零动态

方程

$$\dot{z}_4 = \frac{\partial \varphi}{\partial q} S(q) B_1^{-1}(\varphi) \begin{bmatrix} z_{12} \\ z_{22} \\ z_{32} \\ z_{42} \end{bmatrix} = 0. \quad (20)$$

可见其解显然是稳定的,但非渐进稳定.

为使系统的输出跟踪任一期望输出轨迹 $Z_d = [z_{1d} \ z_{2d} \ z_{3d} \ z_{4d}]^T$,下面对上述线性化子系统(18)设计输出跟踪的二阶动态滑模控制器.

令 $e_1 = Z_1 - Z_d$, $\dot{e}_1 = Z_2 - \dot{Z}_d = e_2$, $\ddot{e}_1 = \dot{e}_2 = Z_3 - \ddot{Z}_d = e_3$, $\ddot{\ddot{e}}_1 = \ddot{e}_3 = v - \ddot{Z}_d$, 得跟踪误差方程为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2, \\ \dot{e}_2 = e_3, \\ \dot{e}_3 = \psi(e, v, t) = v - \ddot{Z}_d. \end{cases} \quad (21)$$

按上面的设计思想选择切换函数: $\sigma = \ddot{e}_1 + C_2 \dot{e}_1 + C_1 e_1$, 选取二阶动态滑模控制的切换函数为

$$S = \dot{\sigma} + C_3 \sigma.$$

其中 C_1, C_2, C_3 为常数对角阵. 选取到达律为

$$\begin{aligned} \dot{S} &= -K \operatorname{sgn} S - WS, \quad (K = \operatorname{diag}(k_i), \\ W &= \operatorname{diag}(w_i), k_i > 0, w_i > 0.) \end{aligned} \quad (23)$$

时,便可保证系统在有限时间内进入滑模运动.

证 现假设有某个分量 S_i 在 t_0 时刻不为零, 当 $S_i(t_0) > 0$ 时, 由于 $\dot{S}_i = -w_i S_i - k_i$, 其解为: $S_i(t) = [S_i(t_0) + w_i^{-1} k_i] e^{-w(t-t_0)} - w_i^{-1} k_i$, 从而当 $t = t_0 - \frac{1}{w_i} \ln \frac{k_i}{w_i S_i(t_0) + k_i}$ 时, 必有 $S_i(t) = 0$; 同理若 $S_i(t_0) < 0$, 则当 $t = t_0 - \frac{1}{w_i} \ln \frac{k_i}{k_i - w_i S_i(t_0)}$ 时, 必有 $S_i(t) = 0$. 故无论哪种情况, 当

$$t \geq t_0 - \frac{1}{w_i} \ln \frac{k_i}{w_i |S_i(t_0)| + k_i} \quad (24)$$

时, 系统都将进入滑动模运动.

而 S_i 为 $\sigma_i, \dot{\sigma}_i$ 的线性组合, 故由 $S_i(t) = 0$, 必有 $\sigma_i = \dot{\sigma}_i = 0$; 而 σ_i 又为 $e_{1i}, \dot{e}_{1i}, \ddot{e}_{1i}$ 的线性组合, 则必有 $e_{1i}(t) = \dot{e}_{1i}(t) = \ddot{e}_{1i}(t) = 0 (i = 1, 2, 3, 4)$, 即在有限时间内系统输出跟踪误差收敛到零.

由式(23)得二阶动态滑模控制律为:

$$\begin{aligned} \dot{v} &= Z_d^{(4)} - K \operatorname{sgn} S - WS - C_1 C_3 \dot{e}_1 - \\ &\quad (C_2 C_3 + C_1) \dot{e}_1 - (C_2 + C_3) \ddot{e}_1 = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &Z_d^{(4)} - (C_2 + C_3)(v - \ddot{Z}_d) - \\ &\quad (C_2 C_3 + C_1)(Z_3 - \ddot{Z}_d) - \\ &\quad C_1 C_3 (Z_2 - \dot{Z}_d) - K \operatorname{sgn} S - WS. \end{aligned} \quad (25)$$

将得到的新控制 $v = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4]^T$ 代入方程(17)中, 即可构成系统的二阶动态滑模控制器. 从(25)可知, 由 $\dot{S} = -WS - K \operatorname{sgn} S$ 引出的所有不连续性都受限于输入信号的1阶导数, 输入信号 v 显然成为不连续函数经过1次积分得到的结果, 不连续项 $-K \operatorname{sgn} S$ 的影响可有相当多的部分转移到 v 的1阶导数项上, 这样就相应削弱了输入信号 v 的抖振.

5 仿真研究 (Simulation research)

为了验证上面所设计的二阶动态滑模控制器的有效性, 我们进行了仿真研究. 仿真是用 Matlab 6.5 进行. 在仿真中, 假定移动机械臂的期望轨迹为: $z_{1d} = 2 \sin t$, $z_{2d} = -3 \cos t$, $z_{3d} = -3 \sin(2t)$, $z_{4d} = \cos(2t)$, 使移动平台的中心位置跟踪椭圆运动, 二连杆角位移跟踪正弦运动.

移动机械臂的有关参数为: $m_0 = 50 \text{ kg}$, $m_1 = 4 \text{ kg}$, $m_2 = 3.5 \text{ kg}$, $R = 0.3 \text{ m}$, $d = 0.3 \text{ m}$, $J_0 = 1.417 \text{ kgm}^2$, $J_1 = 0.03 \text{ kgm}^2$, $J_2 = 0.036 \text{ kgm}^2$, $l = 0.1 \text{ m}$, $l_1 = 0.5 \text{ m}$, $l_2 = 0.35 \text{ m}$. 移动机械臂的初始位置坐标为 $q_{\text{in}} = (0 \ 0 \ 0 \ \frac{\pi}{2} \ \frac{\pi}{6})$. 为简化仿真, 四台驱动电机均采用 80W 的直流伺服电机, 有关的电机参数为: $L = 2.03 \text{ mH}$, $r = 5.41 \ \Omega$, $k_e = 0.02 \text{ V}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$, $k_T = 0.191 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$, 齿轮减速比分别为 $\beta_1 = 71$, $\beta_2 = 51$. 在仿真过程中, C_1, C_2 及 C_3 的选取原则为: 保证多项式 $\lambda^3 + (C_2 + C_3)\lambda^2 + (C_2 C_3 + C_1)\lambda + C_3 C_1 = 0$ 具有指定的实部为负的特征值, 以使系统的滑模运动具有期望的动态品质; K, W 的选取原则为: K 的选取既要保证系统到达滑动面的时间不能太长, 又要尽量减少系统的抖振, K 值越大, 到达时间越短, 但抖振也会加大. 一般对确定的 K , 可通过选取适当大的 W 加快到达滑模运动的时间, 这样既保证系统能尽快进入滑模运动, 又可减少系统抖振对实时控制带来的影响. 在本例中各设计参数分别取为: $K = \operatorname{diag}(2.5, 2.5, 2.5, 2.5)$, $W = \operatorname{diag}(25, 25, 25, 25)$, $C_1 = \operatorname{diag}(4, 4, 10, 10)$, $C_2 = \operatorname{diag}(5, 5, 10, 10)$, $C_3 = \operatorname{diag}(1, 1, 1, 2)$. 计算机仿真结果如图 2 ~ 7 所示.

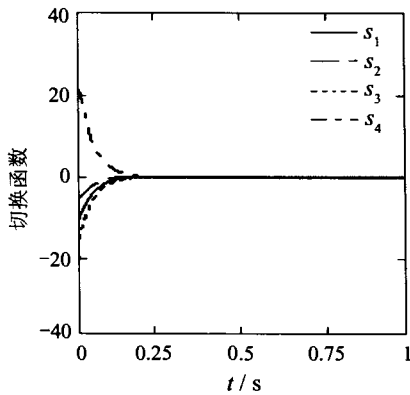


图2 二阶动态切换函数

Fig. 2 Second-order dynamical switching function

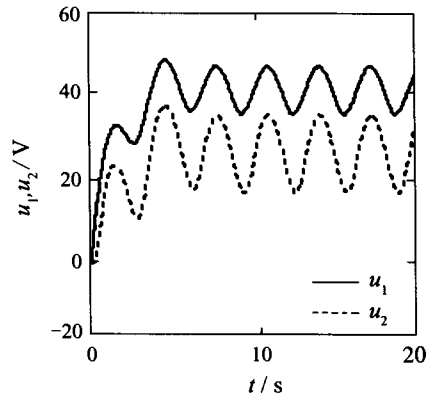


图3 平台左右轮驱动电机控制电压

Fig. 3 Control voltage u_1, u_2

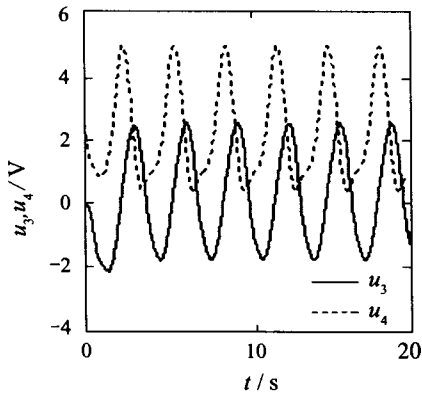


图4 连杆1,2 驱动电机控制电压

Fig. 4 Control voltage u_3, u_4

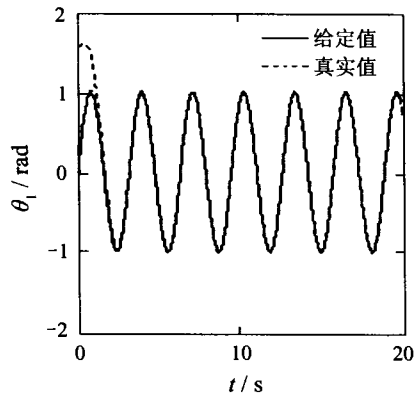


图5 连杆1 的角位移跟踪曲线

Fig. 5 Tracking curve of θ_1

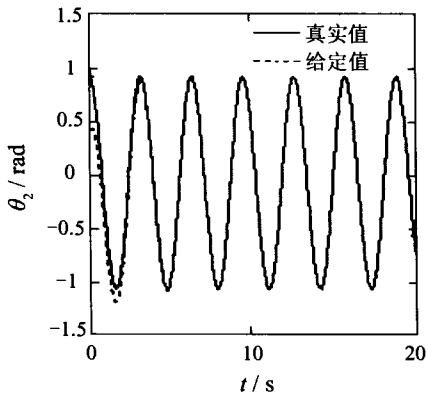


图6 连杆2 的角位移跟踪曲线

Fig. 6 Tracking curve of θ_2

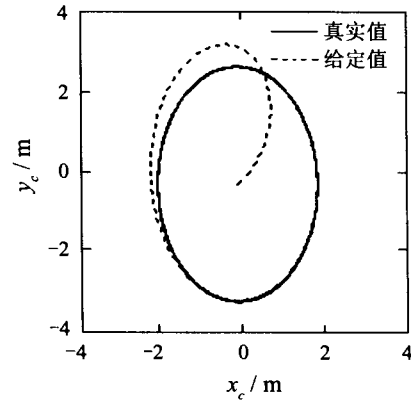


图7 平台质心点的跟踪轨迹

Fig. 7 Tracking trajectory of (x_c, y_c)

从仿真结果可以看出,我们所设计的二阶动态滑模控制器成功地实现了轮式移动机械臂对给定轨迹的跟踪.即使在初始误差较大地情况下,跟踪效果也很好,且未出现系统控制抖振.

6 结论(Conclusion)

本文讨论并推导了包括电机动态的轮式移动机械臂的简化动态模型,采用二阶动态滑模控制对其进行输出跟踪控制.仿真结果表明,该控制方法能很好地实现轮式移动机械臂的输出跟踪,并能有效消

除滑模控制系统的抖振.

参考文献(References):

[1] YOSHIO Y, YUN X P. Coordinating locomotion and manipulation of a mobile manipulator [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(6):1326-1332.
 [2] YOSHIO Y, XIAOPING YUN. Effect of the dynamic interaction on coordinated control of mobile manipulators[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*. 1996, 12(5):816-824.

与原有控制策略相比,响应速度与跟踪精度都得到了明显改善.值得指出的是本文给出的是模糊控制器离线遗传优化方法,如何将遗传算法用于模糊控制的在线优化将是下一步的研究方向.

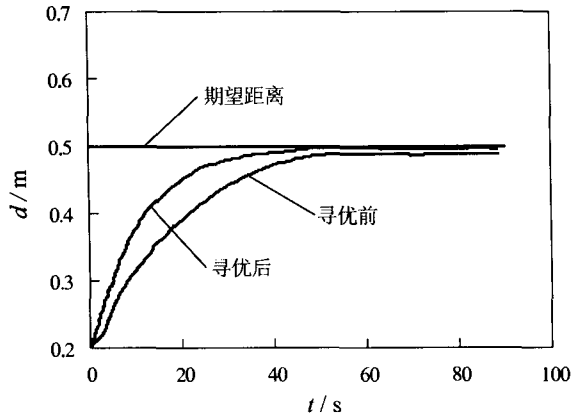


图6 优化结果

Fig. 6 Optimizing result

参考文献 (References):

- [1] PARK D, KANDEL A, LANGHOLZ C. Genetic-based new fuzzy reasoning models with application to fuzzy control [J]. *IEEE Trans on Systems Man & Cybernetics*, 1994, 24(3): 39-47.
- [2] LI R H, ZHANG Y. Fuzzy logic controller based on genetic algorithm [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1996, 83(5): 1-10.
- [3] KARR C L. Design of an adaptive fuzzy logic controller using a genetic algorithm [C] // *Proc the 4th Int Conf Genetic Algorithms*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publication, 1991: 450-457.
- [4] 于华男, 戴军. 基于遗传算法的水下机器人模糊控制器优化设计 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002, 23(5): 12-15. (YU Huanan, DAI Jun. Control of autonomous underwater vehicle using fuzzy logic tuned by genetic algorithms [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2002, 23(5): 12-15.)
- [5] DAVIS L. *Handbook of Genetic Algorithms* [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991: 27-57, 60-110.
- 作者简介:
段 萍 (1973—), 女, 博士研究生, 研究方向: 移动机器人智能控制, 计算机视觉, E-mail: dwj637@eyou.com;
张建畅 (1962—), 男, 博士研究生, 研究方向: 移动机械手协调控制技术, E-mail: jc Zhang@hebut.edu.cn;
丁承君 (1973—), 男, 博士, 研究方向: 移动机器人智能控制, E-mail: dcj@eyou.com;
张明路 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 河北工业大学机械学院院长, 研究方向: 机器人技术及控制理论, 多智能体协调技术研究, E-mail: zhangml@hebut.edu.cn.
- (上接第415页)
- [3] SHENG LIU, GOLDENBERG A A. Robust damping control of mobile manipulators [J]. *IEEE Trans on Systems Man and Cybernetics-part B: Cybernetics*, 2002, 32(1): 126-132.
- [4] DONG W J, Xu Y S, WANG Q. On tracking control of mobile manipulators [C] // *Proc of IEEE Int Conf on Robotics & Automation*. San Francisco, USA: IEEE Press, 2000: 3455-3460.
- [5] ELDEEB Y, ELMARAGHY W H. Robust adaptive control of a robotic manipulator including motor dynamics [J]. *J Robot Syst*, 1998, 15(1): 661-669.
- [6] HU Y M, CHAO H M. High order sliding mode control of nonlinear control systems with application to mobile robots [C] // *Advances in Variable Structure Systems: Analysis, Integration and Applications*. Singapore: World Scientific, 2000: 125-134.
- [7] YOUNG K D, ZGUNER O U. *Variable Structure Systems, Sliding Mode, and Nonlinear Control* [M]. London, New York: Springer, 1999.
- [8] CHAO H M, HU Y M. Dynamical sliding mode control with applications to output tracking of mobile robots [J]. *Control and Decision*, 2001, 16(5): 565-568.
- [9] SIRA RAM IREZ H. On the dynamical sliding mode control of nonlinear systems [J]. *Int J of Control*, 1993, 57(5): 1039-1061.
- [10] LEVANT A. Higher-order sliding modes, differentiation and output-feedback control [J]. *Int J of Control*, 2003, 76(9/10): 924-941.
- [11] WU Y X, HU Y M. Kinematics, dynamics and motion planning of wheeled mobile manipulators [C] // *Proc of Int on Complex Systems Intellingence and Moder Technological Applications*. Cherbourg, France: [s. n.], 2004: 221-226.
- 作者简介:
吴玉香 (1968—), 女, 副教授, 在职博士研究生, 感兴趣的研究方向: 非线性控制, 智能控制及其应用, 机器人控制等, E-mail: xyuwu@scut.edu.cn;
胡跃明 (1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 非线性控制, 智能控制, 机器人控制等.