

具有参数不确定性的轮式移动机器人自适应backstepping控制

孙棣华, 崔明月, 李永福

(重庆大学 自动化学院 重庆 400044)

摘要: 针对参数不确定的轮式移动机器人的轨迹跟踪问题, 设计自适应跟踪控制器. 基于移动机器人的动力学模型, 采用backstepping积分方法, 通过逐步递推选择适当的Lyapunov函数, 设计基于状态反馈的自适应控制器, 并进行了相应的稳定性分析. 与传统PID控制进行仿真对比, 结果表明提出的自适应控制策略能较好地补偿系统参数摄动的影响, 提高了移动机器人的轨迹跟踪性能和鲁棒性.

关键词: 轮式移动机器人; 自适应反演控制; 轨迹跟踪; 参数不确定性

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Adaptive backstepping control of wheeled mobile robots with parameter uncertainties

SUN Di-hua, CUI Ming-yue, LI Yong-fu

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Based on the dynamics model of wheeled mobile robots, an adaptive backstepping method is used to design the controller for tracking the trajectory of wheeled mobile robots with parameter uncertainties. The adaptive control laws based on the state feedback are developed with backstepping approach through a step-by-step selection of appropriate Lyapunov function. The motion stability of the wheeled mobile robot is proved by using the Lyapunov stability theory. Simulation results show that the proposed method greatly compensates the effects of parameter uncertainties and improves the system tracking accuracy and robustness, in comparison with traditional PID control laws.

Key words: wheeled mobile robot; adaptive backstepping control; trajectory tracking; parameter uncertainties

1 引言(Introduction)

轮式移动机器人具有运动可靠稳定, 移动灵活自主, 机构和控制相对简单等优点, 在科研、国防、工业、民用、物流等领域得到广泛的应用. 然而, 由于轮式移动机器人是一个多变量、强耦合、参数时变的非线性对象, 难以对其进行高性能轨迹跟踪的控制. 先前, 在性能要求高的轮式移动机器人运动系统中, 机器人的运动控制主要采用基于精确模型的反馈控制律方法^[1-4]. 在实际应用中, 由于测量和建模不精确, 加上参数时变和负载扰动等因素的影响, 很难获得精确完备的系统模型, 因此基于精确模型的反馈控制往往达不到理论分析所应有的高性能.

为进一步提高轮式移动机器人的轨迹跟踪控制性能, 一些学者将非线性系统的控制方法用于轮式移动机器人的控制, 如状态反馈线性化控制^[5-6]、输入输出解耦控制^[6-7]、变结构控制^[8-11]、无源性控制^[12-13]、反演(backstepping)控制^[14-15]等. 其中反演设计方法易于与自适应控制技术相结合, 能够消除机器人参数时变和外界扰动的影响, 因而受到普遍

重视. 该方法通过定义“虚拟控制”, 将复杂的非线性系统分解成多个更简单、阶数更低的系统进行控制, 由选择的Lyapunov函数来保证系统的稳定性, 并逐步推导出最终的控制律和参数自适应律, 从而实现了对系统的有效控制^[16]. 其中, 文献[14-15]仅仅针对轮式机器人的运动学模型设计路径跟踪控制器, 没有考虑系统摩擦力对机器人运动性能的影响, 且文献[14]没有考虑系统参数的不确定性.

为此, 本文主要研究参数不确定的轮式移动机器人轨迹跟踪控制问题. 首先建立轮式移动机器人的动力学模型, 通过对轮式移动机器人动力学模型方程的结构分析, 将机器人模型方程分解成前进的线速度和方向角两个独立的子系统. 在此基础上, 采用自适应反演方法推导出系统的控制律和时变参数的自适应律. 仿真结果表明, 该控制系统能够快速跟踪给定的参考路径, 并且能够渐近跟踪给定的线速度和角度参考输入; 同时与常规PID控制律相比, 对机器人直流电机的参数变化和路面摩擦系数变化的扰动具有更强的鲁棒性.

2 动力学模型(Dynamic model)

2.1 移动机器人动力学模型的建立(Dynamic model of mobile robots)

假设绝对坐标系 XOY 固定在平面内, 移动机器人的运动示意图如图1所示. 两个前轮为独立驱动轮, 各采用一台直流伺服电机独立驱动, 通过调节各自的输入电压以实现两前轮的速度差, 达到调整车体与跟踪轨迹的位置关系. 移动机器人的后轮为随动轮, 仅起支撑车体的作用, 而无导向作用. 机器人动力学方程中的变量与参数的定义如表1所示, 机器人的动态特性可用下面的动力学方程描述^[17].

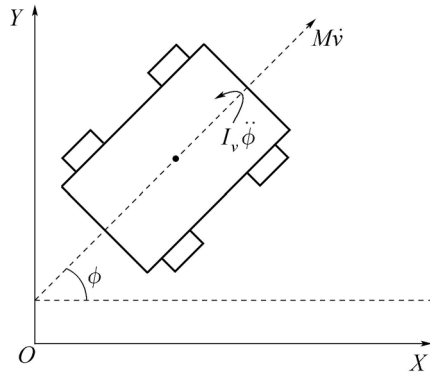


图1 两轮独立驱动的移动机器人

Fig. 1 Mobile robot with two independent drive wheels

表1 机器人变量和参数的符号定义

Table 1 Robot variables and parameters of the symbol definition

符号	物理含义	单位
I_v	绕机器人重心的转动惯量	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
M	机器人总质量	kg
F_l, F_r	左右轮的驱动力	N
L	机器人宽度的一半	m
ϕ	机器人方向角	rad
v	机器人前进速度	m/s
v_l, v_r	左右驱动轮的线速度	m/s
I_w	驱动轮的转动惯量	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
c	轮胎与地面的摩擦系数	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$
k	电机及传动机构的驱动增益	Nm/V
r	车轮半径	m
θ_l, θ_r	左右驱动轮的旋转角度	rad
u_l, u_r	左右电机的驱动电压	V

根据力矩平衡原理, 车体的加速转矩等于左右两驱动轮主动力矩之差, 即

$$I_v \ddot{\phi} = F_r L - F_l L. \quad (1)$$

根据牛顿定律, 得

$$M \dot{v} = F_r + F_l. \quad (2)$$

由力矩平衡原理, 得左右车轮的动态特性:

$$I_w \ddot{\theta}_r + c \dot{\theta}_r = k u_r - r F_r, \quad (3)$$

$$I_w \ddot{\theta}_l + c \dot{\theta}_l = k u_l - r F_l, \quad (4)$$

其中: 下标 r, l 分别表示右和左, c 为车轮轮胎与地面间的滚动摩擦系数, k 为电机及传动机构的驱动增益, 计算公式为 $k = \frac{n k_m}{R_a}$ (电机的电枢电阻 R_a , 减速齿轮传动比 n , 电机的电磁力矩常数 k_m), θ 为车轮转角, r 为车轮半径, u_r, u_l 为左右轮电机的输入电压.

由移动机器人原理知

$$v = \frac{v_r + v_l}{2}, \quad (5)$$

$$L \dot{\phi} = \frac{v_r - v_l}{2}. \quad (6)$$

由式(5)–(6)得

$$v_r = r \dot{\theta}_r = v + L \dot{\phi}, \quad (7)$$

$$v_l = r \dot{\theta}_l = v - L \dot{\phi}. \quad (8)$$

由式(1)–(8)可得

$$\dot{v} = -\frac{2c}{Mr^2 + 2I_w} v + \frac{kr}{Mr^2 + 2I_w} (u_r + u_l), \quad (9)$$

$$\ddot{\phi} = -\frac{2cL^2}{I_v r^2 + 2I_w L^2} \dot{\phi} + \frac{krL}{I_v r^2 + 2I_w L^2} (u_r - u_l). \quad (10)$$

定义状态变量 $x = [v \ \phi \ \dot{\phi}]^T$, 控制输入为 $u = [u_r \ u_l]^T$, 输出变量 $y = [v \ \phi]^T$. 则由式(9)–(10), 得移动机器人的动力学状态方程为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \\ y &= Cx, \end{aligned} \quad (11)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & a_2 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_1 & b_1 \\ 0 & 0 \\ b_2 & -b_2 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$a_1 = -\frac{2c}{Mr^2 + 2I_w}, \quad a_2 = -\frac{2cL^2}{I_v r^2 + 2I_w L^2},$$

$$b_1 = \frac{kr}{Mr^2 + 2I_w}, \quad b_2 = \frac{krL}{I_v r^2 + 2I_w L^2}.$$

机器人在实际应用中, 由于传动系统中减速器齿轮间隙的存在, 驱动电机的参数由于温度、材料磨损等条件的变化以及路面摩擦系数变化而具有的不确定性, 都会引起直流伺服电机传递力矩的变化. 因此, 在控制系统设计中, 必须考虑系统参数电机及传动机构的驱动增益、摩擦系数变化造成的危害.

2.2 系统的解耦(Decouple of system)

系统(11)是一个线性耦合系统, 欲应用backstepping方法进行控制器的设计, 必须对系统进行解耦, 转化为参数严格反馈形式. 令

$$\begin{bmatrix} u_r \\ u_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

则 $u_r = u_1 - u_2$. 将式(12)代入式(11), 则系统(11)可以解耦为以下两个独立的子系统:

$$\dot{v} = a_1 v + b_1 u_1, \quad (13)$$

$$\begin{cases} \dot{\phi} = \omega, \\ \dot{\omega} = a_2 \omega + b_2 u_1 - 2b_2 u_2. \end{cases} \quad (14)$$

下面针对系统式(13)和系统式(14)分别设计控制律.

3 控制器的设计(Design of controller)

由系统状态方程(13)–(14)可知, 系统是两个相互独立的链式子系统. 所以, 本文采用积分反演(backstepping)策略, 通过递推Lyapunov函数的方法, 针对机器人系统的未知参数, 设计基于Lyapunov稳定性理论的自适应跟踪控制器, 使得机器人系统的输出以较高的精度逼近期望输出, 并实现系统的稳定性和自适应能力. 具体的设计步骤如下:

假设 k, c 未知但有界, 且 $c > 0, k > 0$. 首先定义误差

$$\tilde{c} = \hat{c} - c, \quad \tilde{k} = \hat{k} - k,$$

$$\hat{a}_1 = -\frac{2\hat{c}}{Mr^2 + 2I_w}, \quad \hat{b}_1 = \frac{\hat{k}r}{Mr^2 + 2I_w},$$

$$\hat{a}_2 = -\frac{2\hat{c}L^2}{I_v r^2 + 2I_w L^2}, \quad \hat{b}_2 = \frac{\hat{k}rL}{I_v r^2 + 2I_w L^2},$$

$$\tilde{a}_1 = \hat{a}_1 - a_1, \quad \tilde{a}_2 = \hat{a}_2 - a_2,$$

$$\tilde{b}_1 = \hat{b}_1 - b_1, \quad \tilde{b}_2 = \hat{b}_2 - b_2,$$

其中: $\hat{k}, \hat{c}, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{b}_1, \hat{b}_2$ 分别为 k, c, a_1, a_2, b_1, b_2 的估计值.

步骤 1 设理想线速度 v_d 充分光滑, 定义误差函数 $e_1 = v_d - v$, 则线速度误差动态方程为

$$\dot{e}_1 = \dot{v}_d - \dot{v} = \dot{v}_d - a_1 v - b_1 u_1. \quad (15)$$

设理想角度为 ϕ_d 充分光滑, 定义误差函数 $e_2 = \phi_d - \phi$, 则角速度的误差动态方程为

$$\dot{e}_2 = \dot{\phi}_d - \dot{\phi}. \quad (16)$$

定义Lyapunov函数

$$V_1 = \frac{1}{2} e_2^2. \quad (17)$$

对 V_1 沿误差方程求导数, 得

$$\dot{V}_1 = -k_2 e_2^2 + e_2(k_2 e_2 + \dot{\phi}_d - \dot{\phi}). \quad (18)$$

为使上式满足 $\dot{V}_1 = -k_2 e_2^2 < 0$, e_2 渐近稳定收敛到零, 取虚拟控制量

$$\omega^* = k_2 e_2 + \dot{\phi}_d + k_0 \zeta, \quad (19)$$

其中: $k_0 > 0, k_2 > 0$ 是设计常数, 这里引入机器人车体方向角跟踪误差的积分: $\zeta = \int_0^t e_2(\tau) d\tau$, 这样能保证系统在模型不确定情况下, 系统跟踪误差仍

能收敛到零, 进一步增强系统的鲁棒性^[18].

步骤 2 首先定义虚拟控制误差信号

$$e_3 = \omega^* - \omega = k_2 e_2 + \dot{\phi}_d + k_0 \zeta - \dot{\phi} = k_2 e_2 + k_0 \zeta + \dot{e}_2. \quad (20)$$

由式(20)可得

$$\dot{e}_2 = e_3 - k_2 e_2 - k_0 \zeta. \quad (21)$$

由式(14)(20)和式(21)可得系统的误差动态方程为

$$\begin{aligned} \dot{e}_3 &= (k_0 - k_2^2) e_2 + k_2 e_3 - k_0 k_2 \zeta + \\ &\ddot{\phi}_d - a_2 \omega - b_2 u_1 + 2b_2 u_2. \end{aligned} \quad (22)$$

定义Lyapunov函数为

$$V_2 = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1}{2} e_3^2 + \frac{k_0}{2} \zeta^2 + \frac{1}{2\lambda_1} \tilde{c}^2 + \frac{1}{2\lambda_2} \tilde{k}^2, \quad (23)$$

则其沿误差动力学方程(15)(21)–(22)的微分如下:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 + e_1(k_1 e_1 + \dot{v}_d - \\ &\hat{a}_1 v - \hat{b}_1 u_1) + e_3[(k_2 + k_3) e_3 + (k_0 - k_2^2 + \\ &1) e_2 - k_0 k_2 \zeta + \ddot{\phi}_d - \hat{a}_2 \omega - \hat{b}_2 u_1 + \\ &2\hat{b}_2 u_2] + \tilde{c} \left(\frac{a_1 e_1 v}{c} + \frac{a_2 e_3 \omega}{c} + \frac{1}{\lambda_1} \dot{\tilde{c}} \right) + \\ &\tilde{k} \left[\frac{b_1 e_1 u_1}{k} + \frac{b_2 e_3 (u_1 - 2u_2)}{k} + \frac{1}{\lambda_2} \dot{\tilde{k}} \right], \end{aligned} \quad (24)$$

式中: $k_0 > 0, k_1 > 0, k_2 > 0, k_3 > 0, \lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0$ 为设计参数.

选取控制律如下:

$$\begin{cases} u_1 = \frac{1}{\hat{b}_1} (k_1 e_1 + \dot{v}_d - \hat{a}_1 v), \\ u_2 = \frac{1}{2\hat{b}_2} [-(k_2 + k_3) e_3 - (k_0 - k_2^2 + \\ 1) e_2 + k_0 k_2 \zeta - \ddot{\phi}_d + \hat{a}_2 \omega + \hat{b}_2 u_1], \end{cases} \quad (25)$$

式中 $\omega = \dot{\phi}$.

参数自适应律为

$$\begin{aligned} \dot{\hat{c}} &= -\frac{\lambda_1}{c} (a_1 e_1 v + a_2 e_3 \omega), \\ \dot{\hat{k}} &= \frac{\lambda_2}{k} [-b_1 e_1 u_1 + b_2 e_3 (2u_2 - u_1)], \end{aligned} \quad (26)$$

式中:

$$\begin{aligned} a_1 &< 0, a_2 < 0, b_1 > 0, b_2 > 0, \\ \frac{a_1}{c} &= -\frac{2}{Mr^2 + 2I_w}, \quad \frac{a_2}{c} = -\frac{2L^2}{I_v r^2 + 2I_w L^2}, \\ \frac{b_1}{k} &= \frac{r}{Mr^2 + 2I_w}, \quad \frac{b_2}{k} = \frac{rL}{I_v r^2 + 2I_w L^2} \end{aligned}$$

均为常数.

如果系统的控制律与参数自适应律满足式(25)

—(26), 则

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 \leq 0. \quad (27)$$

根据Lyapunov稳定性理论, 自适应系统在控制律式(25)的作用下在Lyapunov稳定意义下是稳定的.

由前面的分析可知, 基于backstepping控制的移动机器人自适应控制的原理可用图2表示.

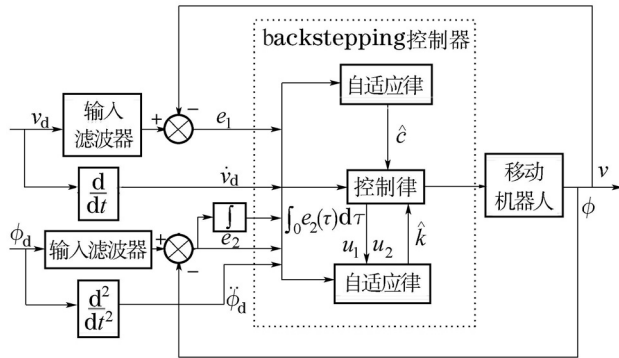


图2 移动机器人自适应backstepping控制原理图
Fig. 2 Adaptive backstepping control schematic of wheeled mobile robots

4 稳定性分析(Analysis of stability)

引理1(Barbalat引理^[19]) 若函数 $f(x)$ 在 $[0, +\infty)$ 上是一致连续的, 并且极限 $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t f(x)dx$ 存在且是一个有限值, 则有 $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = 0$.

定理1 当系统(11)满足控制律(25)和参数自适应律(26)时, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, e_1, e_2, e_3 渐近收敛到零.

证 因为

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 \leq -k_1 e_1^2 \leq 0, \quad (28)$$

所以, V_2 在 $t \in [0, \infty)$ 上是单调非递增函数, 有 $V_2(t) \leq V_2(0), \forall t \in [0, \infty)$. 故 V_2 在 $t \in [0, \infty)$ 上是有界的. 因而, e_1, e_2, e_3 和 \tilde{c}, \tilde{k} 是有界的, 即 $e_1, e_2, e_3 \in L_\infty$.

对式(28)两边积分, 可得

$$\int_0^\infty k_1 e_1^2 dt < - \int_0^\infty \dot{V}_2(t) dt = V_2(0) - V_2(\infty) < \infty, \quad (29)$$

即 $e_1 \in L_2$. 同理可证 $e_2, e_3 \in L_2$, 即有 $e_1, e_2, e_3 \in L_2 \cap L_\infty$. 根据前文的假设, 参考输入 v_d 和 ϕ_d 经滤波处理后是充分光滑连续的, 式(15)(21)和式(22)的右边是有界的, 从而可得 $\dot{e}_1, \dot{e}_2, \dot{e}_3 \in L_\infty$. 因为 $\dot{e}_1, \dot{e}_2, \dot{e}_3 \in L_\infty$, 即 e_1, e_2, e_3 在 $t \in [0, \infty)$ 上是一致连续的. 根据Barbalat引理, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e_1, e_2, e_3 \rightarrow 0$, 即误差 e_1, e_2, e_3 渐近收敛到零. 证毕.

5 输入参考信号的处理(Input reference signal processing)

在工程实际中, 检测到的信号往往包含噪声. 根据前文假设, 为使机器人线速度和方向角信号充分光滑, 对输入的机器人线速度和机器人方向角参考

输入信号 v_d 和 ϕ_d 作平滑滤波处理. 由式(25)–(26)可以看出, 控制律与自适应律表达式中包含参考信号的微分信号, 采用文献[20]所提出的一种包含噪声的信号非线性微分估计算法, $y(t)$ 是包含噪声的被测量信号, $\hat{y}(t)$ 是 $y(t)$ 的估计值, 则滤波的估计算法表达式如下:

$$\hat{y}(t) = \frac{2!}{T^2} \int_{t-T}^t (3(t-\tau) - T)y(\tau) d\tau. \quad (30)$$

微分信号的数值估计:

$$\dot{\hat{y}}(t) = -\frac{3!}{T^3} \int_{t-T}^t (2T(t-\tau) - T)y(\tau) d\tau, \quad (31)$$

$[t - T, t]$ 是一个非常短的滑动时间窗.

6 数值仿真(Simulations)

为了分析参数 k, c 的变化对移动机器人运动控制系统的影响以及验证自适应反演控制算法的正确性, 本文在相同的被控对象和相同的参考轨迹指令 $Y_d = \sin(0.2\pi X) + n(t)$ (其中 $n(t)$ 是幅值为0.01, 均值为0的高斯白噪声干扰信号)作用下, 使用MATLAB/Simulink分别对自适应反演控制方法和常规PID控制方法进行了对比仿真. 初始条件 $(X(0), Y(0)) = (0, 0)$, 方向角 $\phi(0) = 0$, 期望线速度 $v_d = 1 \text{ m/s}$. 仿真过程需要的移动机器人系统模型物理参数如表2所示. 在仿真中, 控制参数经过反复试验和比较确定如下:

$$k_0 = 20, k_1 = 10.3, k_2 = 16, k_3 = 14.5, \lambda_1 = 14.7, \lambda_2 = 2.6.$$

PID控制参数

$$k_p = 3.2, k_i = 0.6, k_d = 0.36.$$

表2 机器人物理参数

Table 2 Physical parameters of the robot

名称	符号	标称值
质量	M	50 kg
驱动轮半径	r	0.125 m
车轮与地面间摩擦系数	c	0.05 kg·m ² /s
绕机器人重心转动惯量	I_v	10 kg·m ²
轮子转动惯量	I_w	0.05 kg·m ²
两驱动轮到机器人重心距离	L	50 kg
电机及传动机构的驱动增益	k	20 Nm/V

6.1 无参数摄动时的轨迹跟踪误差分析(Trajectory tracking error analysis without parameters perturbation)

图3中(a)–(f)分别是无参数摄动条件下移动机器人在PID与自适应反演控制作用下的轨迹跟踪结果以及跟踪误差变化曲线.

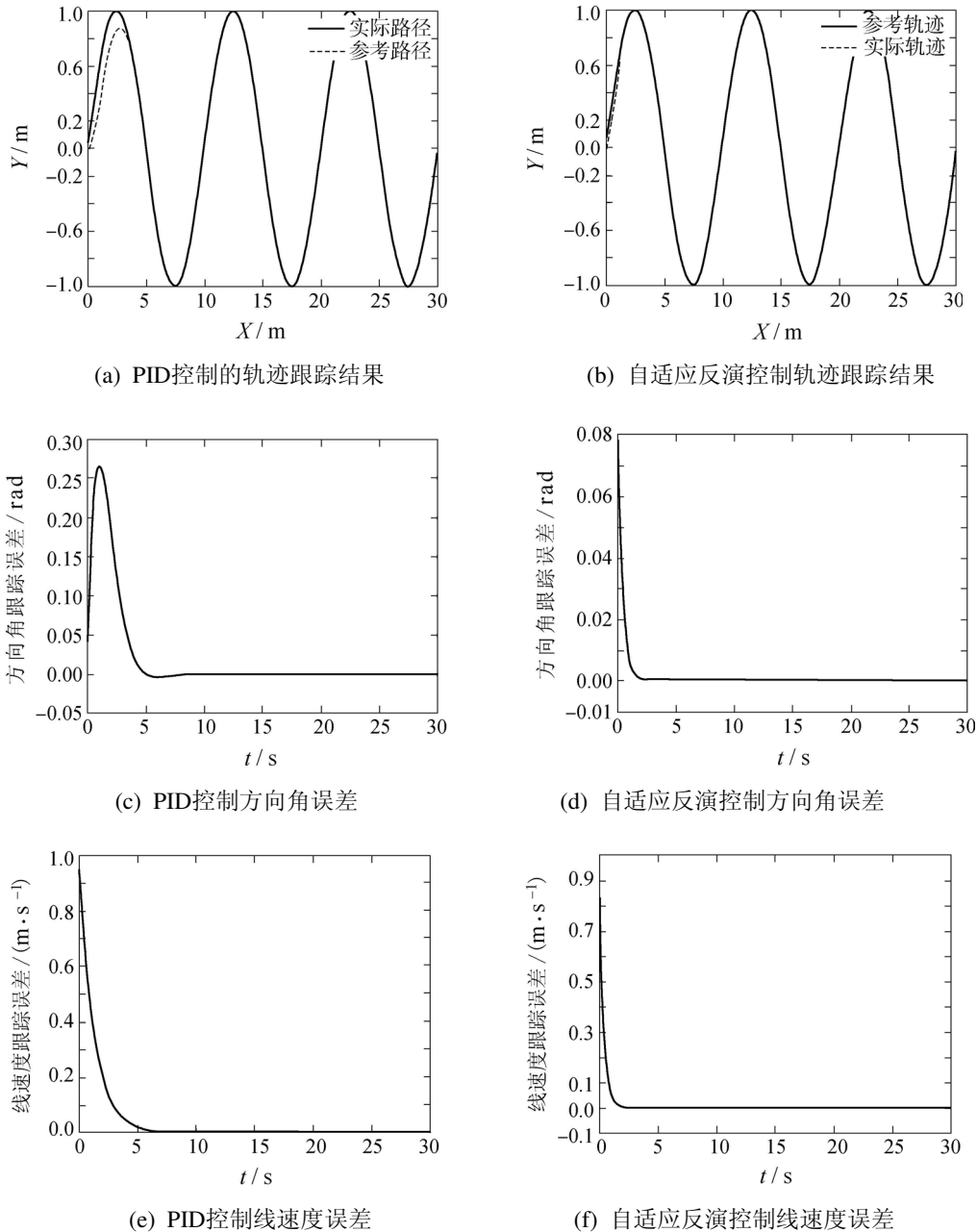


图3 无参数摄动的系统跟踪误差分析

Fig. 3 Tracking error analysis of system without parameters perturbation

由图3中的6幅图可以看出, 轮式移动机器人在自适应反演控制作用下, 同一参考轨迹跟踪的最大误差与误差收敛的时间比常规PID控制均大大减少.

6.2 机器人系统的自适应分析(Robot system adaptive analysis)

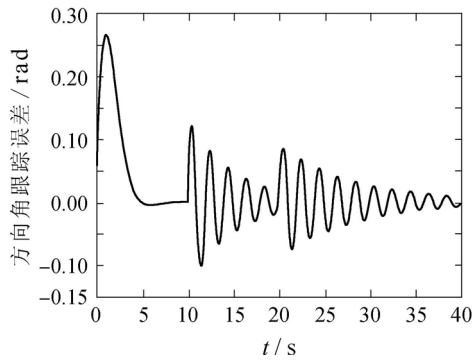
机器人在实际应用中, 由于温度、润滑、材料磨损、道路状况等条件的变化, 都会引起电机及传动机构的驱动增益 k 、轮胎与地面的摩擦系数 c 的变化. 为了验证本文所设计的控制器具有较好的鲁棒性, 图4中(a)–(d)表示当参数 c, k 变化时分别

应用常规PID控制与自适应反演控制算法时, 在相同的参考轨迹

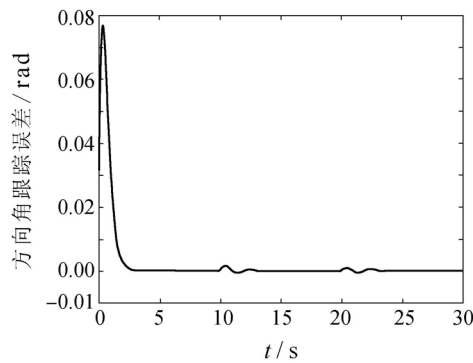
$$Y_d = \sin(0.2\pi X) + n(t)$$

下, 方向角、线速度跟踪误差的变化曲线, 其中常规PID、自适应反演控制器参数与6.1部分中的保持相同. 参数 c, k 变化的情况如下:

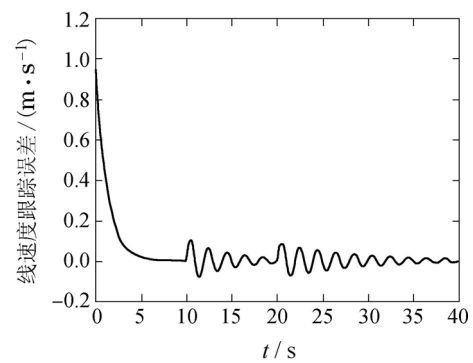
- 1) 车轮与地面间摩擦系数 c 的初始值为 $0.05 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$, 在 $t = 10 \text{ s}$ 时跳变为 $0.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$.
- 2) 电机及传动机构的驱动增益 k 的初始值为 20 Nm/V , 在 $t = 20 \text{ s}$ 时跳变为 15 Nm/V .



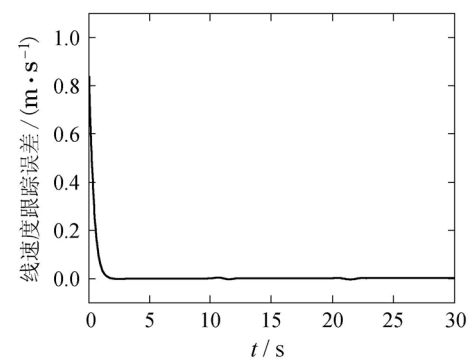
(a) 常规PID控制方向角误差



(b) 自适应反演控制方向角误差



(c) 常规PID控制线速度误差

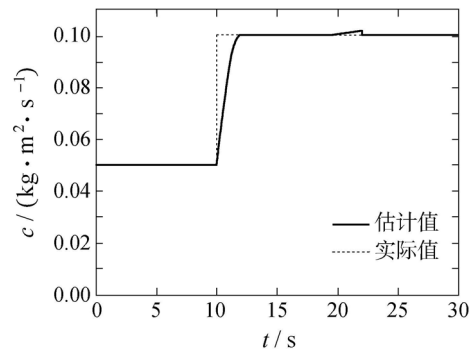


(d) 自适应反演控制线速度误差

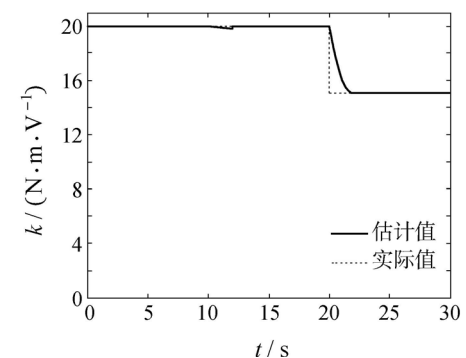
图4 参数摄动的系统跟踪误差分析
Fig. 4 Tracking error analysis of system with parameters perturbation

由图4中通过图(a)与(b)、图(c)与(d)的比较可知, 当电机及传动机构的驱动增益 k 、轮胎与地面的摩擦系数 c 发生变化时, 而常规PID控制和自适应反演控制的控制参数不变的情况下, 系统在常规PID控制下, 方向角与线速度的跟踪误差发生了更为剧烈的振荡, 而系统在自适应反演控制作用下, 方向角与线速度的跟踪误差收敛过程仅发生少许变化, 这主要是由于自适应反演控制器具有自适应能力, 它的某些控制参数是变化的, 并且能根据机器人在实际环境中的实时需要自动在线调整这些参数, 即使系统的参数发生变化, 自适应反演控制器仍能够对发生变化的参数进行比较准确的估计. 因此, 从这些图可以看到, 自适应反演控制算法对机器人参数 c, k 的摄动有较好的鲁棒性和自适应能力.

图5为移动机器人电机及传动机构的驱动增益 k 、轮胎与地面的摩擦系数 c 的估计曲线, 可以看出, c, k 的估计值均能渐近跟踪实际值, 参数估计算法具有良好的性能.



(a) 摩擦系数 c 的估计



(b) 驱动增益 k 的估计

图5 未知参数估计

Fig. 5 Unknown parameters estimation

7 结论(Conclusions)

本文应用自适应反演算法, 针对参数不确定的轮式移动机器人系统设计了能够补偿参数摄动影

响的自适应控制器,使移动机器人能渐近地跟踪期望路径,同时证明了移动机器人的线速度和方向角误差渐近收敛到零.仿真结果表明,受控的移动机器人系统具有良好的路径跟踪性能,即使电机及传动机构的驱动增益、轮胎与地面的摩擦系数等参数发生变化时,机器人自适应反演控制系统仍具有较好的跟踪控制性能,与常规PID相比对机器人参数变化具有更强的鲁棒性.

参考文献(References):

- [1] NORMEY-RICO E, GOMEZ-OMEGA J, CAMACHO E. A Smith-predictor based generalised predictive controller for mobile robot path-tracking [J]. *Control Engineering Practice*, 1999, 7(6): 729 – 740.
- [2] 陈无畏,孙海涛,李碧春,等.基于标识线导航的自动导引车跟踪控制[J].机械工程学报,2006,42(8):164–170.
(CHEN Wuwei, SUN Haitao, LI Bichun, et al. Tracking control of automatic guided vehicle based on lane marker navigation [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(8): 164 – 170.)
- [3] GREGOR K, IGOR S. Tracking-error model-based predictive control for mobile robots in real time [J]. *Robotics and Autonomous System*, 2007, 55(6): 460 – 469.
- [4] 武星,楼佩煌.基于运动预测的路径跟踪最优控制研究[J].控制与决策,2009,24(4):565–569.
(WU Xing, LOU Peihuang. Optimal path tracking control based on motion prediction [J]. *Control and Decision*, 2009, 24(4): 565 – 569.)
- [5] KIM D H. Tracking control of a two-wheeled mobile robot using input-output linearization [J]. *Control Engineering Practice*, 1999, 7(3): 369 – 373.
- [6] 池瑞楠,胡跃明,胡终须.基于解耦控制的非完整移动机器人实时轨迹跟踪[J].机器人,2001,23(3):256–260.
(CHI Ruinan, HU Yueming, HU Zhongxu. Real time trajectory tracking of nonholonomic mobile robots based on decoupling control techniques [J]. *Robot*, 2001, 23(3): 256 – 260.)
- [7] SUN D, DONG H N, TSO S K. Tracking stabilization of differential mobile robots using adaptive synchronized control [C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Washington DC: IEEE, 2002, 8: 2638 – 2643.
- [8] 胡终须,胡跃明,李迪,等.一种关于移动机器人的自适应变结构控制方法[J].控制理论与应用,2001,18(6):919–924.
(HU Zhongxu, HU Yueming, LI Di, et al. An adaptive variable structure control approach for mobile robots [J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 18(6): 919 – 924.
- [9] ZHANG Y L, CHUNG J H, VELINSKY S A. Variable structure control of a differentially steered wheeled mobile robot [J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2003, 36(3): 301 – 314.
- [10] CHEN C Y, LI T S, YEH Y C, et al. Design and implementation of an adaptive sliding-mode dynamic controller for wheeled mobile robots [J]. *Mechatronics*, 2009, 19(2): 156 – 166.
- [11] PARK B S, YOO S J, PARK J B, et al. Adaptive neural sliding mode control of nonholonomic wheeled mobile robots with model uncertainty [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, 17(1): 207 – 214.
- [12] DONG W J. On trajectory and force tracking control of constrained mobile manipulators with parameter uncertainty [J]. *Automatica*, 2002, 38(9): 1475 – 1484.
- [13] 温淑,袁俊英.基于无源性的不确定机器人的力控制[J].物理学报,2010,59(3):1615–1619.
(WEN ShuHuan, YUAN Junying. Force control of uncertain robot based on the passivity [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(3): 1615 – 1619.)
- [14] JIANG Z P, NIJMEIJEV H. Tracking control of mobile robots: a case study in backstepping [J]. *Automatica*, 1997, 33(7): 1393 – 1399.
- [15] DONG W, HUO W, TSO S K, et al. Tracking control of uncertain dynamic nonholonomic system and its application to wheeled mobile robots [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2000, 16(6): 870 – 874.
- [16] 张兴华.具有参数和负载不确定性的感应电机自适应反步控制[J].控制与决策,2006,21(12):1379–1386.
(ZHANG Xinghua. Adaptive backstepping control of induction motors with parameter and load uncertainties [J]. *Control and Decision*, 2006, 21(12): 1379 – 1386.)
- [17] WATANABE K, TANG J, NAKAMURA M, et al. A fuzzy-gaussian neural network and its application to mobile robot control [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1996, 4(2): 193 – 199.
- [18] TAN Y L, CHANG J TAN H L, HU J. Integral backstepping control and experimental implementation for motion system [C] // *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Control Applications*. Anchorage, Alaska, USA: IEEE, 2000, 9: 25 – 27.
- [19] POPOV V M. *Hyperstability of Control Systems* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1973.
- [20] MBOUP M, JOIN C, FLIESS M. Numerical differentiation with annihilators in noisy environment [J]. *Numer Algor*, 2009, 50(4): 439 – 467.

作者简介:

孙棣华 (1962–),男,博士,教授,博士生导师,目前主要从事智能交通系统、计算机控制与企业信息管理等相关研究, E-mail: d3sun@163.com;

崔明月 (1974–),男,博士研究生,目前主要从事智能机器人控制技术相关研究, E-mail: cuiminyue@sina.com;

李永福 (1984–),男,博士研究生,目前主要从事智能交通系统与非线性控制等相关研究, E-mail: laf1212@163.com.