

参数不确定移动机器人全局轨迹跟踪的自适应滑模控制

张 鑫, 刘凤娟, 闫茂德

(长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064)

摘 要: 通过对一类质心和几何中心不重合情况下移动机器人轨迹跟踪问题的研究, 得到了两独立驱动轮角速度为控制输入的机器人运动学模型. 对于车轮半径和两驱动轮之间距离参数已知情况, 基于反演控制的思想设计了变结构控制的切换函数, 构造了具有全局渐近稳定的滑模轨迹跟踪控制律, 并针对这两个参数未知时, 通过自适应方法对其进行参数估计, 给出了自适应滑模轨迹跟踪控制律的设计方法. 该方法设计过程简单且具有直观的稳定性分析, 适用于移动机器人的全局轨迹跟踪控制. 仿真算例验证了所提控制律的有效性和正确性.

关键词: 非完整移动机器人; 轨迹跟踪; 自适应滑模控制; 反演控制

中图分类号: TP39

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)07-0132-04

Adaptive Sliding Mode Control of Global Trajectory Tracking for Mobile Robots with Parameter Uncertainties

ZHANG Xin, LIU Feng-juan, YAN Mao-de

(School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: A robot kinematic model with two independent driven wheel angular velocities as control inputs was obtained through the observation and analysis of trajectory tracking problem for nonholonomic mobile robot whose mass centers are not coincidental with the geometrical centers. Based on the backstepping control algorithm, a switch function for variable structure control is designed and a sliding-mode tracking control law with global asymptotically stability is proposed for these systems with the known wheel radius and the distance between the two driving wheels. In order to deal with the circumstance with the unknown two parameters above, an adaptive sliding-mode tracking control law is proposed by employing the adaptive method to estimate the unknown parameters. This method simplifies the controller design and is applicable to the trajectory tracking control of the mobile robot. The global asymptotically stability of the closed loop system is guaranteed by Lyapunov direct method. Simulation results are provided to demonstrate the effectiveness and correctness of the proposed method.

Key words: nonholonomic mobile robot; trajectory tracking; adaptive sliding mode control; backstepping control

1 引言

近年来, 非完整系统的控制问题得到广泛研究, 轮式移动机器人(Wheeled Mobile Robot, WMR)作为一类典型的非完整系统, 其镇定控制与轨迹跟踪问题越来越受到人们的重视. 由于非完整力学系统不满足 Brockett 光滑反馈镇定的必要条件, 因而不能用光滑或连续的时不变状态反馈来实现其轨迹跟

踪控制. 文献[1-7]对移动机器人的轨迹跟踪问题进行了研究, 构造了具有全局渐近稳定性的滑模轨迹跟踪控制器, 并根据 Lyapunov 理论证明了系统全局渐近稳定性. 上述研究成果均假设移动机器人的质心和几何中心重合, 而对于约束非理想情况下的移动机器人, 其结果就不适用. 文献[8]针对移动机器人模型的质心和几何中心不重合的情况, 分析了轮式移动机器人的运动学数学模型, 设计结构轨迹

收稿日期: 2010-11-21; **修回日期:** 2010-12-16

基金项目: 陕西省科学技术研究计划项目(2009K08-18); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2009JC038)

跟踪控制器,实现对预定轨迹的全局渐近跟踪,但没有考虑车轮半径和两驱动轮之间距离参数未知的情况;文献^[9]利用自适应技术解决了车轮半径和两驱动轮之间距离参数未知时的镇定问题,但没有实现轨迹跟踪控制,且其镇定控制是通过设计移动机器人质心线速度和转向角速度实现,设计方法势必会引入一定的跟踪和建模误差。

文中通过对一类质心和几何中心不重合的两轮独立驱动移动机器人轨迹跟踪控制问题的研究,得到了以两驱动轮角速度为控制输入的机器人运动学模型.对于车轮半径和两驱动轮之间距离参数已知情况,基于反演(backstepping)控制的思想设计了变结构控制的切换函数,构造了具有全局渐近稳定的滑模轨迹跟踪控制律,并针对这两个参数未知时,通过自适应方法对其进行参数估计,给出了自适应滑模轨迹跟踪控制律,并根据 Lyapunov 理论证明了系统全局渐近稳定性.仿真结果验证了其有效性和正确性。

2 移动机器人跟踪问题模型

文中对具有两个同轴的驱动轮、一个或多个平衡轮的移动机器人进行研究. (x, y) 为移动机器人质心 M 在 XOY 坐标系中的坐标; θ 为机器人的方向角,即运动方向与 X 轴的夹角; r 为轮子半径, $2b$ 为两轮之间的距离; c 为机器人两个驱动轮的几何中心, M, C 两点之间的距离为 d . 双后轮差动驱动时,移动机器人表现为非协调系统. 在移动机器人的工作平面内建立直角坐标系,非协调双后轮差动驱动移动机器人如图 1 所示. 当不考虑车轮的滑动时,移动机器人的运动学方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \theta + \frac{r}{2b} d \sin \theta & \frac{r}{2} \cos \theta - \frac{r}{2b} d \sin \theta \\ \frac{r}{2} \sin \theta - \frac{r}{2b} d \cos \theta & \frac{r}{2} \sin \theta + \frac{r}{2b} d \cos \theta \\ \frac{r}{2b} & -\frac{r}{2b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, ω_L, ω_R 分别为两驱动后轮的角速度; r 和 $2b$ 分别代表移动机器人车轮的半径和两个驱动后轮轴的距离。

由于该移动机器人的 M 点和 C 点不重合,当驱动轮满足纯滚动、无滑动的条件时,移动机器人受非完整约束 $\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta - d \dot{\theta} = 0$, 由非完整约束可得参考机器人的运动学模型为:

$$\dot{x}_r = v_r \cos \theta_r + d \omega_r \sin \theta_r,$$

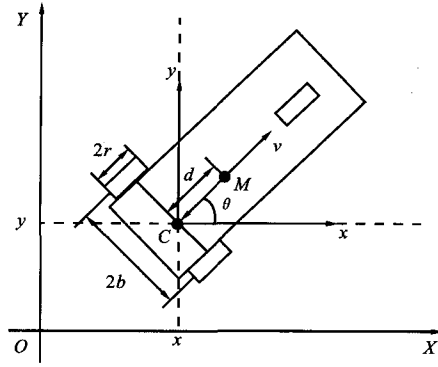


图1 移动机器人的结构示意图

$$\dot{y}_r = v_r \sin \theta_r - d \omega_r \cos \theta_r, \quad (2)$$

$$\dot{\theta}_r = \omega_r$$

其中, $p_r = (x_r, y_r, \theta_r)$ 为参考移动机器人的位姿; (v_r, ω_r) 为参考移动机器人的控制输入, v_r 为其线速度, ω_r 为其转向角速度。

文中的控制目标是在参数 r, b 未知的情况下,寻求适当的受控移动机器人后轮角速度控制输入 ω_L, ω_R , 使得

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} |x_r - x| &= 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} |y_r - y| = 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |\theta_r - \theta| &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

参考文献^[1]的方法,位置和航向跟踪误差 $p_e = (x_e, y_e, \theta_e)^T$ 定义为

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

对式(4)求微分,可得如下跟踪控制系统的误差微分方程

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \omega_R \begin{bmatrix} -\frac{r}{2} + \frac{r}{2b} y_e \\ -\frac{r}{2b} x_e + \frac{r}{2b} \\ -\frac{r}{2b} \end{bmatrix} + \omega_L \begin{bmatrix} -\frac{r}{2} - \frac{r}{2b} y_e \\ \frac{r}{2b} x_e - \frac{r}{2b} \\ \frac{r}{2b} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_r \cos \theta_e + d \omega_r \sin \theta_e \\ v_r \sin \theta_e + d \omega_r \cos \theta_e \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (5)$$

通过上述变换,该类型移动机器人的跟踪控制问题转化为误差系统(5)的镇定问题.文中研究的跟踪控制问题可表述为设计合适的后轮角速度控制输入 ω_L, ω_R , 使得非完整移动机器人误差系统(5)的状态 $p_e = (x_e, y_e, \theta_e)^T$ 全局一致渐近稳定,即满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|(x_e, y_e, \theta_e)\|^T = 0$.

移动机器人的两后轮角速度 ω_L, ω_R 与线速度 v 、角速度 ω 之间具有如下的关系:

$$\begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/r & b/r \\ 1/r & -b/r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (6)$$

将式(6)代入式(1)中,可以得到移动机器人运动学模型的一般形式

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & d\sin\theta \\ \sin\theta & -d\cos\theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (7)$$

移动机器人坐标内描述的位姿误差微分方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = v \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} y_e \\ d-x_e \\ -1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_r \cos\theta_e + \omega_r d \sin\theta_e \\ v_r \sin\theta_e + \omega_r d \cos\theta_e \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (8)$$

3 全局轨迹跟踪的自适应滑模控制

上述移动机器人运动学模型是多输入非线性系统. 文中借鉴文献^[10]引入反演(backstepping)控制算法设计变结构控制的切换函数. 其思想是,对于式(5),当 $x_e = 0$ 时,对部分 Lyapunov 函数 $V_y = \frac{1}{2}y_e^2$ 考察. 由文献[3]引理可知, $\theta_e = -\arctan(v_r, y_e)$ 可使 y_e 收敛. 显然,只要 x_e 收敛到零, θ_e 收敛到 $-\arctan(v_r, y_e)$,则 y_e 也收敛到零,同时由 θ_e 的定义可知, $-\arctan(v_r, y_e)$ 也将收敛到零,从而最终 θ_e 收敛到零. 因此,只要设计 v 和 ω 使得 $x_e \rightarrow 0$ 且 $\theta_e \rightarrow -\arctan(v_r, y_e)$,系统状态最终会收敛. 根据这个思想,切换函数设计为

$$s(P_e) = \begin{bmatrix} s_1(p_e) \\ s_2(p_e) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_e \\ \theta_e + \arctan(v_r, y_e) \end{bmatrix} \quad (9)$$

利用变结构控制的指数趋近律

$$\dot{s} = -K \cdot s - \Gamma \cdot \text{sgn}(s) \quad (10)$$

其中 $K = \text{diag}(k_1, k_2)$, $\Gamma = \text{diag}(\delta_1, \delta_2)$, $k_1, k_2, \delta_1, \delta_2$ 为正的设计参数. 根据滑模控制理论,系统满足可达条件 $\dot{s}s < 0$,且是全局到达的. 系统状态将在滑模控制的作用下于有限时间内到达滑动模态 $s(p_e) = 0$,即 $x_e = 0$ 且 $\theta_e = -\arctan(v_r, y_e)$. 令 $\alpha = \arctan(v_r, y_e)$,对式(9)求时间导数,并将式(8)代入式(10)得

$$\dot{s}(p_e) = \begin{bmatrix} -k_1 s_1 - \delta_1 \text{sgn}(s_1) \\ -k_2 s_2 - \delta_2 \text{sgn}(s_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e \omega - v + v_r \cos\theta_e + \omega_r d \sin\theta_e \\ \omega_r - \omega + \frac{\partial \alpha}{\partial v_r} \dot{v}_r + \frac{\partial \alpha}{\partial y_e} (-x_e \omega + d\omega + v_r \sin\theta_e - \omega_r d \cos\theta_e) \end{bmatrix} \quad (11)$$

计算得 v 和 ω 的表达式为

$$\begin{aligned} v &= y_e \omega + v_r \cos\theta_e + d\omega_r \sin\theta_e + k_1 s_1 + \delta_1 \text{sgn}(s_1) \\ \omega &= \frac{\omega_r + \frac{\partial \alpha}{\partial v_r} \dot{v}_r + \frac{\partial \alpha}{\partial y_e} v_r \sin\theta_e - \frac{\partial \alpha}{\partial y_e} \omega_r d \cos\theta_e + k_2 s_2 + \delta_2 \text{sgn}(s_2)}{1 + \frac{\partial \alpha}{\partial y_e} x_e - \frac{\partial \alpha}{\partial y_e} d} \end{aligned} \quad (12)$$

由于移动机器人两驱动后轮的半径 r 和两个驱动轮轴的距离 b 未知,则不能根据式(6)得到两后轮角速度 ω_R 和 ω_L . 可以利用 r 和 b 的估计值来设计自适应轨迹跟踪控制器,将 ω_R 和 ω_L 设计为如下形式的控制输入

$$\begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 & \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_1 & -\hat{\beta}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1 + \tilde{\beta}_1 & \beta_2 + \tilde{\beta}_2 \\ \beta_1 + \tilde{\beta}_1 & -\beta_2 - \tilde{\beta}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, $\beta_1 = 1/r$, $\beta_2 = b/r$, $\tilde{\beta}_1 = \hat{\beta}_1 - \beta_1$, $\tilde{\beta}_2 = \hat{\beta}_2 - \beta_2$. 将式(13)代入式(5)得位姿误差微分方程

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = (1 + \frac{\tilde{\beta}_1}{\beta_1}) v \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + (1 + \frac{\tilde{\beta}_2}{\beta_2}) \omega \begin{bmatrix} y_e \\ d-x_e \\ -1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_r \cos\theta_e + d\omega_r \sin\theta_e \\ v_r \sin\theta_e - d\omega_r \cos\theta_e \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (14)$$

选择 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2}s_1^2 + \frac{1}{2}s_2^2 + \frac{1}{2\gamma_1\beta_1}\tilde{\beta}_1^2 + \frac{1}{2\gamma_2\beta_2}\tilde{\beta}_2^2 \quad (15)$$

其中 γ_1, γ_2 为正增益常数. 对 Lyapunov 函数求时间导数得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s_1 \dot{s}_1 + s_2 \dot{s}_2 + \frac{\tilde{\beta}_1}{\gamma_1\beta_1} \dot{\tilde{\beta}}_1 + \frac{\tilde{\beta}_2}{\gamma_2\beta_2} \dot{\tilde{\beta}}_2 = s_1 \left[-\frac{\tilde{\beta}_1}{\beta_1} \right] v + \\ & y_e \omega \frac{\tilde{\beta}_2}{\beta_2} - k_1 s_1 - \delta_1 \text{sgn}(s_1) + s_2 \left[-k_2 s_2 - \delta_2 \text{sgn}(s_2) - \right. \\ & \left. \frac{\tilde{\beta}_2}{\beta_2} \omega (1 + \frac{\partial \alpha}{\partial y_e} (x_e - d)) \right] + \frac{\tilde{\beta}_1}{\gamma_1\beta_1} \dot{\tilde{\beta}}_1 + \frac{\tilde{\beta}_2}{\gamma_2\beta_2} \dot{\tilde{\beta}}_2 = -k_1 s_1^2 - \\ & \delta_1 |s_1| - k_2 s_2^2 - \delta_2 |s_2| + \frac{\tilde{\beta}_1}{\gamma_1\beta_1} (\dot{\tilde{\beta}}_1 - \gamma_1 s_1 v) + \frac{\tilde{\beta}_2}{\gamma_2\beta_2} [\dot{\tilde{\beta}}_2 \\ & + \gamma_2 s_1 y_e \omega - \gamma_2 \omega s_2 (1 + \frac{\partial \alpha}{\partial y_e} (x_e - d))] \end{aligned} \quad (16)$$

取参数自适应律为

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\beta}}_1 &= \gamma_1 s_1 v \\ \dot{\hat{\beta}}_2 &= \gamma_2 \omega s_2 [1 + \frac{\partial \alpha}{\partial y_e} (x_e - d)] - \gamma_2 y_e s_1 \omega + f(\hat{\beta}_2) \end{aligned} \quad (17)$$

$$f(\hat{\beta}_2) = \begin{cases} 0, & \hat{\beta}_2 > \lambda \\ (1 - \frac{\hat{\beta}_2}{\lambda})^2 (f_0^2 + 1), & \hat{\beta}_2 \leq \lambda \end{cases} \quad (18)$$

其中 $f_0 = \gamma_2 \omega s_2 (1 + \frac{\partial}{\partial y_e} x_e) + \gamma_2 s_1 y_e \omega$, λ 为正常数且 $\lambda \leq \beta_2$. 将式(17)代入式(16)整理得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -k_1 s_1^2 - \delta_1 |s_1| - k_2 s_2^2 \\ &\quad - \delta_2 |s_2| + \frac{\hat{\beta}_2 - \beta_2}{\gamma_2 \beta_2} f(\hat{\beta}_2) \\ &\leq -k_1 s_1^2 - k_2 s_2^2 + \frac{\hat{\beta}_2 - \beta_2}{\gamma_2 \beta_2} f(\hat{\beta}_2) \end{aligned} \quad (19)$$

当 $\hat{\beta}_2 > \lambda$ 时, 式(19)中最后一项为零, $\dot{V} \leq 0$; 当 $\hat{\beta}_2 \leq \lambda$ 时, $f(\hat{\beta}_2) \geq 0$, $\hat{\beta}_2 - \beta_2 \leq \lambda - \beta_2 \leq 0$, 得 $\dot{V} \leq 0$. 只要 $v_r, \dot{v}_r$ 和 $\omega_r, \dot{\omega}_r$ 在 $[0, +\infty)$ 有界, 则由式(12)可知 v 和 ω 有界. 并且由式(19)可知 s_1, x_e 和 s_2 一致有界, 且 $\lim_{t \rightarrow \infty} s_1 = 0$ 和 $\lim_{t \rightarrow \infty} s_2 = 0$. 由前面的分析可知, 只要 s_1 和 s_2 收敛到零, 则 $\lim_{t \rightarrow \infty} y_e = 0$. 当 $v_r \neq 0$ 时, 由于 $\lim_{t \rightarrow \infty} y_e = 0$ 和 $\lim_{t \rightarrow \infty} \theta_e = \lim_{t \rightarrow \infty} [s_2 - \arctan(v_r y_e)]$, 则 $\lim_{t \rightarrow \infty} \theta_e = 0$. 因此, 实际上有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|(x_e, y_e, \theta_e)^T\| = 0$. 至此完成了移动机器人的自适应滑模轨迹跟踪控制器设计, 上述结果以定理的形式表述为

定理 设 $\forall t \in [0, \infty)$, $v_r, \dot{v}_r$ 和 $\omega_r, \dot{\omega}_r$ 有界, 则在滑模控制律(12)和参数自适应律(17)的作用下, 由方程式(5)描述的移动机器人运动学跟踪误差全局一致有界, 并且当 $v_r \neq 0$ 时, 有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|(x_e, y_e, \theta_e)^T\| = 0$.

4 仿真结果

对移动机器人系统进行了仿真研究. 考虑模型(1)所示的移动机器人系统, 模型参数 $b = 0.75$ m 和 $r = 0.15$ m 未知, $d = 0.25$ m.

选取参考移动机器人的控制输入为: $v_r = 1.5$ m/s, $\omega_r = 1$ rad/s, 即期望轨迹作圆周运动. 初始位姿为: $x_r(0) = \frac{\sqrt{2}}{2} - d \cos \frac{3\pi}{4}$, $y_r(0) = \frac{\sqrt{2}}{2} - d \cos \frac{3\pi}{4}$, $\theta_r(0) = \frac{3\pi}{4}$.

设受控移动机器人的初始位姿为: $x(0) = 0$, $y(0) = 0$, $\theta(0) = 2$. 利用控制律(12)和参数自适应律(17), 取 $k_1 = k_2 = 5$, $\delta_1 = \delta_2 = 0.5$, $\gamma_1 = \gamma_2 = 10$, $\lambda = 5$, $\hat{\beta}_1(0) = \hat{\beta}_2(0) = 0$, 采用加边界层的消颤方法, 取边界层宽度 $B = 0.05$. 在 $0 \sim 20$ 秒的时间内对移动

机器人系统进行仿真分析, 仿真结果如图2所示.

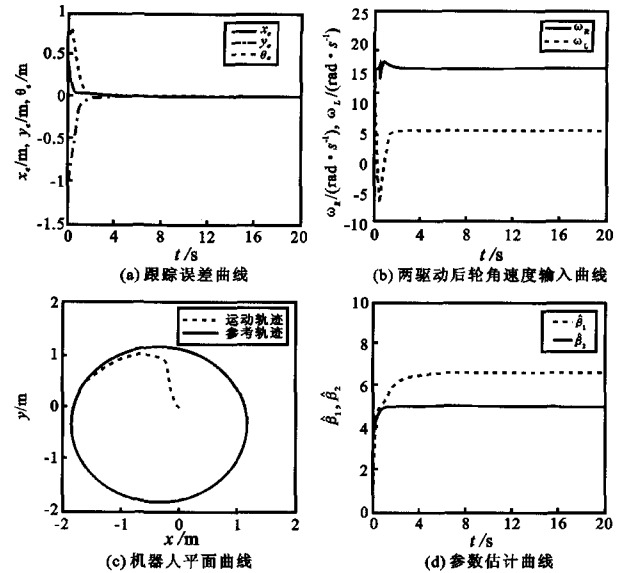


图2 仿真结果曲线

从图2的仿真结果可以看出, 在全局轨迹跟踪的自适应滑模控制器作用下, 系统在不到4秒的时间内即进入稳态, 参数估计收敛, 初始跟踪误差很快收敛到零, 闭环系统具有良好的动态特性、轨迹跟踪效果和全局渐近稳定性, 且对未知参数具有良好的适应性和鲁棒性.

5 结束语

文中通过对一类质心和几何中心不重合的两轮独立驱动移动机器人轨迹跟踪控制问题的研究, 得到了以两驱动轮角速度为控制输入的机器人运动学模型, 并针对车轮半径与车轮之间的距离已知和未知两种情况, 分别构造了具有全局渐近稳定性的滑模变结构和自适应滑模轨迹跟踪控制律, 实现对参考轨迹的全局渐近跟踪, 并根据 Lyapunov 理论证明了系统全局渐近稳定性. 仿真结果验证了其有效性和正确性.

参考文献:

- [1] Kanayama Y, Kimura Y, Miyazaki F, et al. A stable tracking control method for an autonomous mobile robot [C]// Proc of IEEE Conf on Robotics and Automation cincinnati, OH, USA; IEEE, 1990: 384-389.
- [2] Kim D H, Oh J H. Globally asymptotically stable tracking control of mobile robot [C]// Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications, Trieste, Italy; IEEE, 1998: 1297-1301.

(下转第138页)

所需拷贝样本集的数量. 例如, 选择 2MB 的文件样本集, 将文件样本集的数量选为 200, 这样就会有 400MB 的文件数据拷贝到 40MB 的磁盘分区; 当系统检测到磁盘分区的已用空间超过某一阈值时, 便根据归档策略选择文件进行归档操作, 将需要进行归档的文件拷贝到云端的存储服务器, 然后释放出客户端磁盘分区的存储空间, 以容纳更多的文件数据;

(3) 运行文件读取脚本, 读取被归档的文件, 看可否正常读取. 对于已经归档的文件, 系统会自动从云端的服务器拷贝本地客户端服务器, 然后执行客户端的读文件命令, 客户端就像使用本地文件一样使用文件, 并不会知道文件是从远端的服务器读取的, 只是有时会觉得稍微有点延迟.

表 1 给出了部分测试用例, 测试结果表明: 系统不仅可以正确、可靠的运行, 而且可以为客户端节约 10 倍以上的存储空间.

表 1 测试用例(磁盘分区大小为 40MB)

文件样本 集类型(MB)	文件样本 集数量(个)	文件样本 数据大小(MB)	节约客户端 存储空间(倍)
40	10	400	10
20	20	400	10
10	50	500	12.5
2	200	400	10
2	300	600	15

5 结束语

文中所述方法在原型系统得以实现和验证, 可以有效地解决云存储中备份客户端由于数据量的增长而导致的存储空间不足和性能下降的问题. 但是还需要进一步的研究和完善, 例如: 如何支持客户端集群的归档需求、如何提供更加有效的归档策略等.

参考文献:

- [1] 巴力立. 企业数据中心改革: 从云计算到云存储 [EB/OL]. (2009-08-19)[2010-03-13]. <http://www.chinacloud.cn/show.aspx?id=2451&cid=30>.
- [2] 曾龙海, 张博锋, 张丽华, 等. 基于云计算平台的虚拟集群构建技术研究[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(8): 31-35, 40.
- [3] 王鹤群. 云存储的应用 [J]. 记录媒体技术, 2008 (5): 60-64, 51.
- [4] 胡金鹏, 张延园, 姜楠, 等. 远程数据复制系统的日志保护机制研究[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(11): 117-120.
- [5] 李煜民, 章才能, 谢杰. 云计算环境下的数据存储[J]. 电脑知识与技术, 2010, 6(5): 1032-1034.
- [6] Enterprise Strategy Group (ESG). Hitachi Content Archive Platform [EB/OL]. (2006-06-01)[2010-03-13]. <http://www.hds.com/assets/pdf/esg-report-on-the-hitachi-content-archive-platform.pdf>.

作者简介:

范中磊 男, (1970-) 博士, 教授. 研究方向为分布式存储与计算.

(上接第 135 页)

- [3] 吴卫国, 陈辉堂, 王月娟. 移动机器人的全局轨迹跟踪控制[J]. 自动化学报, 2001, 27(3): 326-331.
- [4] 叶涛, 侯增广, 谭民, 等. 移动机器人的滑模轨迹跟踪控制[J]. 高技术通讯, 2004(11): 71-74.
- [5] Fukao T, Nakagawa H, Adachi N. Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000, 16 (5): 609-615.
- [6] Kim M S, Shin K H, Hong S G, et al. Designing a robust adaptive dynamic controller for nonholonomic mobile robots under modeling uncertainty and disturbances [J]. Mechatronics, 2003, 13: 507-519.
- [7] 闫茂德, 贺显曜, 吴青云. 移动机器人全局轨迹跟踪的自适应滑模控制[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(4): 97-100.

- [8] 程俊林, 赵东风. 轮式移动机器人滑模轨迹跟踪控制 [J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2007, 29(S1): 64-67.
- [9] 李传峰, 王朝立. 一类不确定非完整运动学系统的鲁棒镇定[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(4): 427-431.
- [10] Kristic M, Kanellakopoulos, Kokotovic P V. Nonlinear and adaptive control design [M]. New York: Wiley, 1995.

作者简介:

张鑫 男, (1974-), 博士研究生, 研究方向为移动机器人自主导航与轨迹跟踪控制.

闫茂德 男, (1985-), 博士研究生, 研究方向为非线性系统控制和机器人学.