

文章编号: 1001-0920(2007)10-1119-06

带拖车移动机器人全局路径跟踪控制

苑晶^a, 黄亚楼^b, 孙凤池^b

(南开大学 a. 信息技术科学学院, b. 软件学院, 天津 300071)

摘要: 研究带拖车移动机器人的前向路径跟踪控制和倒车路径跟踪控制问题. 首先建立系统的运动学模型, 并进行系统的运动特性分析; 然后基于 Lyapunov 方法提出一种新的单体移动机器人全局路径跟踪控制器, 并将其引入带拖车移动机器人的前向路径跟踪控制; 再通过运动学变换, 实现了拖挂任意节拖车的系统的倒车路径跟踪控制; 最后针对三车体系统的两种路径跟踪控制进行仿真, 结果表明了该方法的有效性.

关键词: 带拖车移动机器人; 全局路径跟踪控制; 前向运动; 倒车运动

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Global path following control of tractor-trailer mobile robot

YUAN Jing^a, HUANG Ya-lou^b, SUN Feng-chi^b

(a. College of Information Technical Science, b. College of Software, Nankai University, Tianjin 300071, China.

Correspondent: YUAN Jing, E-mail: nkyuanjing@eyou.com)

Abstract: The forward and backward path following control for tractor-trailer mobile robot (TTMR) are investigated. First, the kinematic model of the system pulling N trailers is established and its characteristics are analyzed. Then, by using Lyapunov method, a global path following controller for single-body mobile robot is designed and extended into the forward path following control for the TTMR. After that, based on the above controller, a novel approach to the backward path following control for the TTMR is proposed by the transformation of its kinematics. Finally, simulations for three-body TTMR are presented, and the results show the effectiveness of the approach.

Key words: Tractor-trailer mobile robot; Global path following control; Forward motion; Backward motion

1 引言

带拖车移动机器人由一节牵引车和若干节拖车组成, 牵引车执行驱动和转向任务, 拖车被动跟随牵引车运动. 这类机器人系统通常用于自动化工厂、机场、车站、航运码头、核环境等场合, 执行物料传送、行李搬运、货物运输等任务.

带拖车移动机器人主要的控制问题是路径跟踪控制. 由于多车体的存在, 使得这一问题变得十分复杂, 特别是倒车跟踪成为这类机器人控制的难点. 目前, 带拖车移动机器人的路径跟踪控制主要包括 3 类研究方法: Lyapunov 方法、线性化方法和构造虚拟机器人方法.

基于 Lyapunov 理论的控制方法是带拖车移动机器人路径跟踪控制的主要方法. Samson 通过坐标变换和输入变换将系统转化为斜对称链式形式, 采用 Lyapunov 方法设计了全局渐近收敛的时变反馈

控制器, 不仅能用于路径跟踪控制, 而且可实现镇定控制^[1]. Astolfi 等同样基于 Lyapunov 方法, 提出了指数级收敛的局部跟踪控制器, 用于这类机器人的直线和圆弧前向跟踪控制^[2]. Kim 等针对两车体系统, 基于 Lyapunov 方法设计了渐近收敛的倒车跟踪控制器^[3], 然而该方法并未解决控制器的奇异问题.

线性化方法也是带拖车机器人路径跟踪控制的一种重要方法. 文献[4]首先对标准连接的系统(相邻车体的连接点位于前一车体后轮轴中心)进行精确反馈线性化, 然后研究非标准连接的系统(相邻车体的连接点位于前一车体后轮轴之后), 这种系统不能实现精确反馈线性化, 但与标准连接的系统具有相似的运动特性. 文中建立了两种连接形式之间的数量关系, 使它们在跟踪直线和圆弧的稳态下具有相同的运动行为. 然而, 该方法是针对两车体和三车

收稿日期: 2006-06-07; 修回日期: 2006-08-04.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60175030).

作者简介: 苑晶(1980—), 男, 天津人, 博士生, 从事非完整系统控制、智能机器人导航的研究; 黄亚楼(1964—), 男, 河北沧州人, 教授, 博士生导师, 从事智能机器人系统、智能信息处理等研究.

体系系统提出的,对于拖车节数更多的情况不具有通用性.文献[5]同样采用线性化的方法,为车型机器人和一节拖车组成的系统,设计了针对直线和圆弧的前向跟踪和倒车跟踪的不连续反馈控制器.然而,该控制器切换过于频繁,且难以适用于拖车节数更多的情况.

Lamiriaux 等针对挂接一节拖车的系统,构造出一个位于拖车后方且与牵引车对称的虚拟机器人,通过控制虚拟机器人向前运动,实现原系统的倒车跟踪^[6].Li 等研究了带拖车移动机器人的前向跟踪和倒车跟踪的困难性,并对车体节数变化时的控制复杂程度进行分析^[7].

现有研究方法往往存在以下问题:1)控制器设计复杂,且很多情况下存在奇异;2)有些控制器难以适用于倒车跟踪控制;3)大多数控制方法不能推广到挂接任意节拖车的系统.针对上述问题,本文对拖挂任意节拖车的系统进行研究,基于 Lyapunov 方法提出可用于实现前向和倒车全局跟踪的控制方法.

2 运动特性

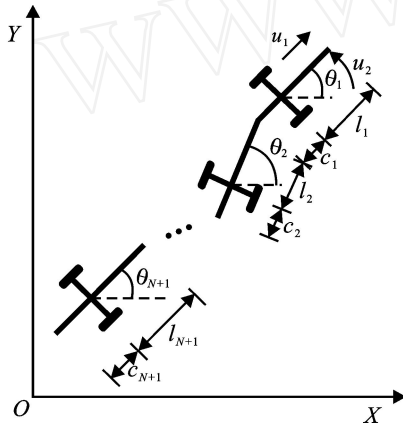


图1 带N节拖车的移动机器人系统

如图1所示,对于拖挂N节拖车的系统, $[x_1, y_1, \theta_1, \dots, x_{N+1}, y_{N+1}, \theta_{N+1}]$ 表示系统位形; u_1 和 u_2 分别为牵引车的线速度和角速度,它们共同构成系统的两个控制输入; l_i 和 c_i 分别为第*i*节车体与前一节车体和后一节车体之间的连杆长度.带N节拖车的机器人系统具有 $N + 3$ 维状态,但只有两个控制输入,因此是一类典型的欠驱动系统.

由图1可知,系统的运动学模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{bmatrix} u_1; \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{i-1} \\ y_{i-1} \end{bmatrix} - c_{i-1} \begin{bmatrix} \cos \theta_{i-1} \\ \sin \theta_{i-1} \end{bmatrix} - l_i \begin{bmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{V}_i = \cos(\theta_{i-1} - \theta_i) V_{i-1} + c_{i-1} \sin(\theta_{i-1} - \theta_i) \dot{\theta}_{i-1}, \\ \dot{\theta}_i = \frac{1}{l_i} [\sin(\theta_{i-1} - \theta_i) V_{i-1} - c_{i-1} \cos(\theta_{i-1} - \theta_i) \dot{\theta}_{i-1}]. \end{cases} \quad (3)$$

其中: V_i 表示第*i*节车体中心点的线速度; $i = 2, 3, \dots, N + 1$.

对于带拖车移动机器人这类复杂的机械系统,当牵引车跟踪某一路径时,所有车体的运动轨迹通常各不相同,即系统运动会产生多条轨迹,这一点明显区别于单体机器人.文献[8]证明了如下结论:

引理1 对于连接参数满足 $l_i < c_{i-1} (\forall i = 2, 3, \dots, N + 1)$ 的带N节拖车的系统,当牵引车向前跟踪半径 $r_{\min} = r_{\min}$ 的圆形路径运动时,所有拖车的运动路径都将指数级收敛于一组同心圆,且同心圆半径

$$r_i = \sqrt{r_{i-1}^2 + c_{i-1}^2 - l_i^2}, i = 2, 3, \dots, N + 1.$$

其中

$$r_{\min} = \sqrt{\frac{(c_N + l_{N+1} \cos \phi_{\max})^2}{\sin^2 \phi_{\max}} + \sum_{k=2}^{N+1} (l_k^2 - c_{k-1}^2)}$$

表示机器人的最小允许转弯半径; ϕ_{\max} 为相邻车体之间的最大允许夹角,由系统机械结构决定.

连接参数满足 $l_i < c_{i-1} (\forall i = 2, 3, \dots, N + 1)$ 的情况与引理1类似,具体结果可参见文献[8].

三车体系统向前跟踪半径为1m的圆形路径仿真结果如图2(a)所示.其中:系统初始位形 $[x_1, y_1, \theta_1, \theta_2, \theta_3] = [1, 0, \pi/2, \pi/2, \pi/2]$, $u_1 = 1 \text{ m/s}$, $u_2 = 1 \text{ rad/s}$.当牵引车以倒车方式跟踪圆弧路径时,情况则不同,系统在相同初始状态下倒车跟踪圆形路径的仿真结果如图2(b)所示.其中: $u_1 = -1 \text{ m/s}$, $u_2 = -1 \text{ rad/s}$.

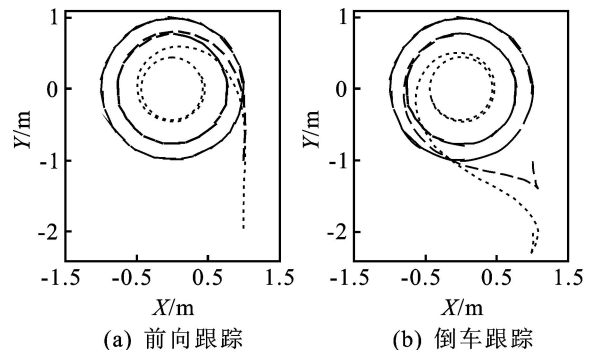


图2 牵引车跟踪圆形路径仿真结果

由图2(b)可见,当牵引车倒车跟踪时,两节拖车首先倒车运动,然后变为向前运动,直至收敛到稳态.此时第一节拖车的连杆可能与牵引车车体发生碰撞甚至挤压,特别是当 $l_i = c_{i-1} (\forall i = 2, 3, \dots, N + 1)$ 时,挤压必然发生,从而违反系统的物理结构

配置.由此可见,带拖车移动机器人的前向跟踪控制在很多情况下类似于单体机器人,而其倒车跟踪比单体机器人复杂得多.

3 带拖车移动机器人路径跟踪控制

3.1 单体两轮移动机器人路径跟踪控制

文献[9-12]提出多种两轮机器人路径跟踪控制器,但却难以推广到带拖车机器人的路径跟踪控制,因为上述控制器的线速度均为系统的状态反馈,其大小和方向随系统状态的变化而变化.即当系统处于某些位形时,线速度可能为负,此时机器人执行倒车,会出现图 2(b)的不合理运动.为避免这一现象,本文针对两轮单体机器人设计出一种新的控制器,其线速度取期望值而非系统的状态反馈.因此,无论期望机器人前向跟踪还是倒车跟踪,系统的运动方向始终保持与期望方向一致.

假设期望路径 $y_d = f(x_d)$ 可表示为时间的参数方程形式 $(x_d(t), y_d(t))$,由两轮系统运动学模型知,期望线速度 $u_{1d} = \pm \sqrt{\dot{x}_d^2 + \dot{y}_d^2}$,期望姿态角

$$\alpha_d = \arctan(\dot{y}_d / \dot{x}_d) + k, k \in \mathbb{Z}. \quad (4)$$

若期望机器人前向跟踪期望路径,则 u_{1d} 取正, $\alpha_d = \arctan(\dot{y}_d / \dot{x}_d) + 2m\pi, m \in \mathbb{Z}$;若期望机器人倒车跟踪期望路径,则 u_{1d} 取负, $\alpha_d = \arctan(\dot{y}_d / \dot{x}_d) + (2m + 1)\pi, m \in \mathbb{Z}$.系统的期望角速度为

$$u_{2d}(t) = \frac{\ddot{y}_d(t)\dot{x}_d(t) - \ddot{x}_d(t)\dot{y}_d(t)}{\dot{x}_d^2 + \dot{y}_d^2}, u_{1d} > 0. \quad (5)$$

建立系统路径跟踪的误差模型

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_d & \sin \alpha_d & 0 \\ -\sin \alpha_d & \cos \alpha_d & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d - x \\ y_d - y \\ \alpha_d - \alpha \end{bmatrix}, \quad (6)$$

则

$$\lim_t (e_x, e_y, e) = (0, 0, 2m\pi) \Leftrightarrow$$

$$\lim_t (x, y, \alpha) = (x_d, y_d, \alpha_d + 2m\pi).$$

针对两轮单体移动机器人,本文给出如下全局路径跟踪控制器:

定理 1 假设期望路径为 $\alpha_d(x_d, y_d)$, x_d 和 y_d 三阶可导且三阶导数有界, $u_{1d} > 0$.若控制输入取

$$\begin{cases} u_1 = u_{1d}, \\ u_2 = u_{2d} + \frac{2}{k_2} [2k_1 u_{1d} (e_y \cos \frac{e}{2} - e_x \sin \frac{e}{2}) + \sin \frac{e}{2}]. \end{cases} \quad (7)$$

则系统的运动将渐近收敛到 α_d .其中 $k_1 > 0, k_2 > 0$.

证明 由式(6)得

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & e_y \\ 0 & -e_x \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{1d} \cos e \\ u_{1d} \sin e \\ u_{2d} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

构造 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} k_1 (e_x^2 + e_y^2) + k_2 (1 - \cos \frac{e}{2}),$$

$$\dot{V} = k_1 (e_x \dot{e}_x + e_y \dot{e}_y) + \frac{k_2}{2} \sin \frac{e}{2} \dot{e} =$$

$$\dots = -\sin^2(e/2) \leq 0.$$

因为 $V \geq 0, \dot{V} \leq 0$, 所以 $V \leq L$, 且 $\lim_t \sin(e/2) = 0$. 即 $\lim_t e = 2m\pi, m \in \mathbb{Z}$. 由 Lyapunov 函数知, $e_x, e_y \leq L$. 根据式(7), $u_1, u_2 \leq L$. 由式(8)知, $\dot{e}_x, \dot{e}_y, \dot{e} \leq L$. 又因 $\ddot{e} = \ddot{u}_{2d} - \ddot{u}_2$, 而 $\dot{u}_{1d} = \pm(\dot{x}_d \ddot{x}_d + \dot{y}_d \ddot{y}_d) / \sqrt{\dot{x}_d^2 + \dot{y}_d^2}$, 所以 $\dot{u}_{1d} \leq L$. 则 $\ddot{e} \leq L, \dot{e}$ 一致连续.

根据扩展的Barbalat引理,可知 $\lim_t \dot{e} = 0 \Rightarrow \lim_t e_y = 0$, 所以 $\lim_t u_2 = u_{2d}$. 由式(8)知 $\ddot{e}_y \leq L$, 因此 \dot{e}_y 一致连续. 又因 $\lim_t e_y = 0$, 所以 $\lim_t \dot{e}_y = \lim_t (-e_x u_2 + u_{1d} \sin e) = \lim_t (-e_x u_{2d}) = 0$. 由式(8)知, $\dot{e}_x = e_y u_2 - u_{1d} (1 - \cos e) \leq 0$, 且 $e_x \leq L$, 则 $\lim_t e_x = 0$ 或 $\lim_t u_{2d} = 0$. 若 $\lim_t u_{2d} = 0$, 则由式(5)知, 期望路径 α_d 的曲率 $k_d = 0$, 此时期望路径趋于直线. 由 $\lim_t e_y = 0$ 和 $\lim_t e = 0$ 可知, $-\sin \alpha_d (x_d - x) + \cos \alpha_d (y_d - y) = 0$, 即 $(y_d - y) / (x_d - x) = \tan \alpha_d$. 说明此时 (x, y) 位于期望直线 (x_d, y_d) 上, 即机器人已经收敛到 α_d .

综上所述,当控制输入取式(7)时,系统的运动将渐近收敛于期望路径 α_d .

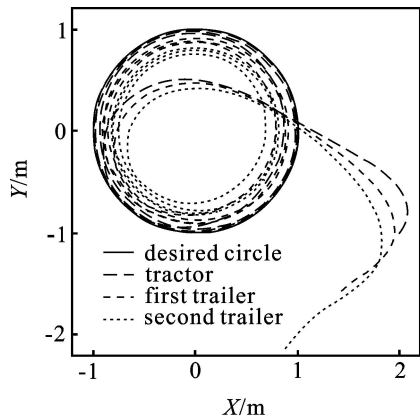
本文设计的控制器形式上和计算上都很简单,并可避免极坐标变换^[12]和构造虚拟车^[13]两种常用方法而引入的奇异问题,因此是一种便于实际应用的控制器.

3.2 带拖车移动机器人前向路径跟踪控制

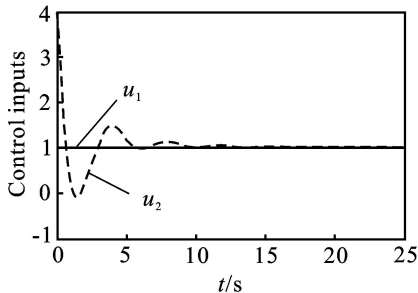
对于带拖车移动机器人,由于拖车无任何驱动而完全被动跟随牵引车运动,当系统向前跟踪期望路径时,只要期望路径的曲率满足 $k_d \leq 1/r_{\min}$, 则该问题类似于控制单体机器人向前跟踪期望路径. 为此给出如下控制器:

推论 1 假设期望路径为 $\alpha_d(x_{1d}, y_{1d})$, x_{1d} 和 y_{1d} 三阶可导且三阶导数有界.若牵引车控制输入取

$$\begin{cases} u_1 = u_{1d}, \\ u_2 = u_{2d} + \frac{2}{k_4} [2k_3 u_{1d} (e_{y1} \cos \frac{e_1}{2} - e_{x1} \sin \frac{e_1}{2}) + \sin \frac{e_1}{2}]. \end{cases} \quad (9)$$

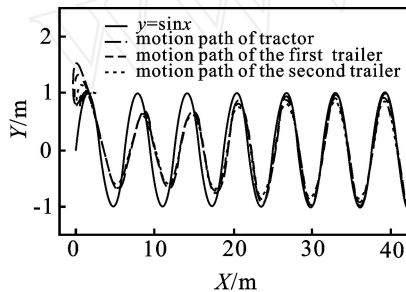


(a) 运动路径

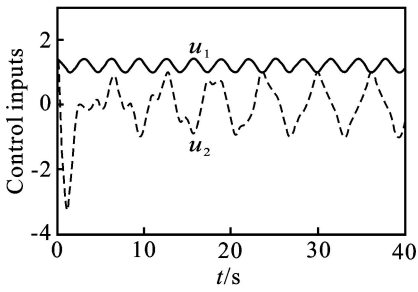


(b) 控制输入

图 3 圆形路径前向跟踪控制仿真结果



(a) 运动路径



(b) 控制输入

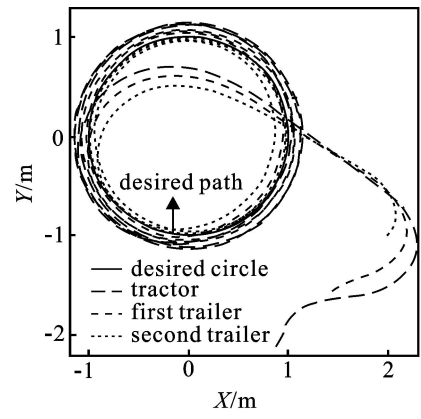
图 4 正弦路径前向跟踪控制仿真结果

的仿真结果如图 4 所示。

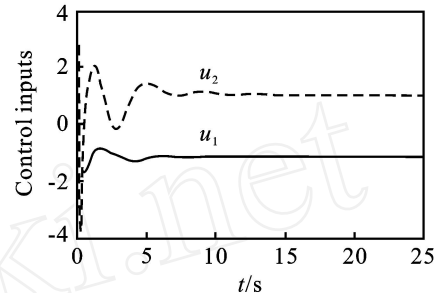
4.2 倒车跟踪控制仿真

期望路径选为圆 $(\cos(t), \sin(t))$, 系统初始位形 $[x_3, y_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3] = [2, -1.5, \pi/4, \pi/4, \pi/4]$. 执行式(10), 得到的仿真结果如图 5 所示。

期望路径选为正弦曲线 $(t, \sin t)$, 初始位形 $[x_3, y_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3] = [1, 1, 0, 0, 0]$. 执行式(10), 得到的仿真结果如图 6 所示。

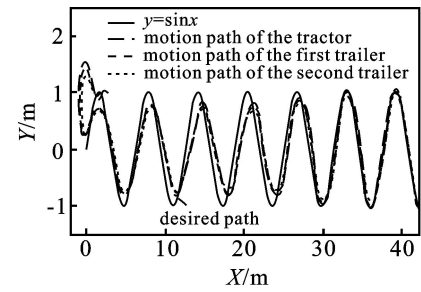


(a) 运动路径

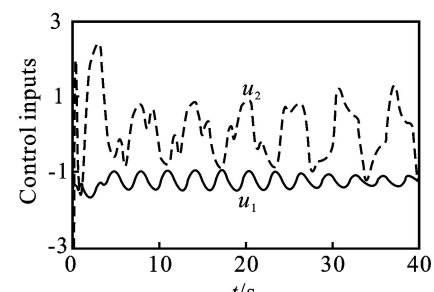


(b) 控制输入

图 5 圆形路径倒车跟踪控制仿真结果



(a) 运动路径



(b) 控制输入

图 6 正弦路径倒车跟踪控制仿真结果

5 结 语

本文系统地研究了带拖车机器人的路径跟踪控制问题. 针对单体两轮机器人设计具有一致运动方向的跟踪控制器, 并将其推广到拖挂任意节拖车的带拖车机器人的前向和倒车跟踪控制, 提出了全局渐近收敛的控制器, 从而有效地解决了这类机器人的路径跟踪控制难题。

文中设计的带拖车机器人的前向和倒车路径跟踪控制器,都是基于单体机器人跟踪控制器实现的,因此二者具有相同的形式,便于实际应用.另外,上述控制器简单、有效,且可避免常用控制器中的奇异问题,非常适用于带拖车机器人的实际控制.

参考文献(References)

- [1] Samson C. Control of chained systems: Application to path following and time-varying point-stabilization of mobile robots[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1995, 40(1): 64-77.
- [2] Astolfi A, Bolzern P, Locatelli A. Path-tracking of a tractor-trailer vehicle along rectilinear and circular paths: A Lyapunov-based approach[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2004, 20(1): 154-160.
- [3] Kim D H, Oh J H. Experiments of backward tracking control for trailer system[C]. Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Michigan, 1999: 19-22.
- [4] Bolzern P, De Santis R M, Locatelli A, et al. Path-tracking for articulated vehicles with off-axle hitching [J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 1998, 6(4): 515-523.
- [5] Altafini C, Speranzon A, Wahlberg B. A feedback control scheme for reversing a truck and trailer vehicle [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2001, 17(6): 915-922.
- [6] Lamiroux F, Sekhavat S, Laumond J P. Motion planning and control for Hilare pulling a trailer [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1999, 15(4): 640-651.
- [7] Li W, Tsubouchi T, Yuta S. On a manipulative difficulty of a mobile robot with multiple trailers for pushing and towing [C]. Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Michigan, 1999: 13-18.
- [8] 徐国华. 带拖车移动机器人系统研究[D]. 天津: 南开大学, 1998.
(Xu Guo-hua. Research on tractor-trailer wheeled mobile robot system[D]. Tianjin: Nankai University, 1998.)
- [9] Tayebi A, Rachid A. Path following control law for an industrial mobile robot[C]. Proc of IEEE Int Conf on Control Applications. Dearborn, 1996: 703-707.
- [10] Wu W, Chen H, Wang Y. A novel global tracking control method for mobile robots[C]. Proc of IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Kyongju, 1999: 623-628.
- [11] Oriolo G, Luca A D, Vendittelli M. WMR control via dynamic feedback linearization: Design, implementation and experimental validation[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2002, 10(6): 835-852.
- [12] Wu W, Chen H, Wang Y. Backstepping design for path tracking of mobile robots[C]. Proc of IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Kyongju, 1999: 1822-1827.
- [13] Egerstedt M, Hu X, Stotsky A. Control of mobile platforms using a virtual vehicle approach[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2001, 46(11): 1777-1782.

下 期 要 目

- 可重构技术及其在网络控制系统中的应用综述 周纯杰, 等
- 基于克隆选择调节算法的 IIR 数字滤波器设计 洪 露, 等
- 微分 Petri 网的稳定性分析 陈国培, 等
- 无线传感器网络中的分簇融合决策方法 王 雪, 等
- 受扰奇异摄动时滞组合大系统的近似最优控制 张宝琳
- 一种求解多目标 job shop 排序问题的混合进化算法 师瑞峰
- 基于 SVM-K 近邻非参数 LDA 的高分辨雷达自动目标识别 刘 敬, 等
- 机动目标跟踪的一种自适应“当前”模型 陈嘉鸿, 等