

8-5-2020

Online Identification Path Following Cascade Control of Non-holonomic Mobile Robot

Zilong Liu

1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; ;

Shaokai Hu

1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; ;

Liu Jie

2. Core of Measure Control, North East Light Alloy Co. , Ltd. , Harbin 150060, China;

Yagang Wang

1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; ;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Online Identification Path Following Cascade Control of Non-holonomic Mobile Robot

Abstract

Abstract: A DC motor driven wheeled mobile robot path following control problem was considered, *where the robot model was regarded as a cascade system consisting of the equation of the drive motor and the mobile robot kinematics equations. Taking the output speed of motor-driven equation as the input of the kinematic equations, identifying these time-varying parameters of the driven equation online, adding the values after identification to the controller, a feedback linearization path following control scheme was proposed. The scheme both investigates the dynamic characteristics of kinematics model and motor drive, so that the results better follow the actual cases.* The stability proof and simulation results based on Lyapunov show the correctness and validity of the method.

Keywords

mobile robot, online identification, cascaded system, feedback linearization, path following

Recommended Citation

Liu Zilong, Hu Shaokai, Liu Jie, Wang Yagang. Online Identification Path Following Cascade Control of Non-holonomic Mobile Robot[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(11): 2748-2755.

非完整移动机器人在线辨识级联路径跟随控制

刘子龙¹, 胡少凯¹, 刘洁², 王亚刚¹

(1. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 东北轻合金有限责任公司, 计量控制中心, 哈尔滨 150060)

摘要: 研究了一类直流电机驱动的轮式移动机器人路径跟随控制问题。轮式移动机器人模型被视为由电机的驱动方程和移动机器人的运动学方程所组成的级联系统, 将电机驱动方程输出的转速作为运动学方程的输入, 在线辨识驱动方程中的时变参数, 将辨识结果加入到控制器中, 制定出反馈线性化路径跟随控制方案, 该方案同时兼顾了车体运动学模型、电机驱动模型的动态特性, 使得研究结果与实际相符合。基于李亚普诺夫稳定性的证明和仿真结果证明了该方法的正确性和有效性。

关键词: 移动机器人; 在线辨识; 级联系统; 反馈线性化; 路径跟随

中图分类号: TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 11-2748-08

Online Identification Path Following Cascade Control of Non-holonomic Mobile Robot

Liu Zilong¹, Hu Shaokai¹, Liu Jie², Wang Yagang¹

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Core of Measure Control, North East Light Alloy Co., Ltd., Harbin 150060, China)

Abstract: A DC motor driven wheeled mobile robot path following control problem was considered, where the robot model was regarded as a cascade system consisting of the equation of the drive motor and the mobile robot kinematics equations. Taking the output speed of motor-driven equation as the input of the kinematic equations, identifying these time-varying parameters of the driven equation online, adding the values after identification to the controller, a feedback linearization path following control scheme was proposed. The scheme both investigates the dynamic characteristics of kinematics model and motor drive, so that the results better follow the actual cases. The stability proof and simulation results based on Lyapunov show the correctness and validity of the method.

Keywords: mobile robot; online identification; cascaded system; feedback linearization; path following

引言

轮式移动机器人在工业生产, 以及国防中都有广泛的应用。

与其相关的描述方程有 3 种: 运动学方程、动力学方程、电机驱动方程。关于他们之间的相互关系, 现在观点不尽相同。

采用单一运动学模型来设计控制方案: 文献[1]采用了一种新颖的反馈控制方案, 该方案即不需要实际位姿在理想位姿上的投影, 也不需要跟随虚拟目标, 而是通过一个隐形函数 $f(x, y) = 0$ 来使得车体渐进收敛到平面曲线, 并且在 $\nabla f \neq 0$ 时, 车体的初始位置任意; 文献[2]提出了一种基于智能协调的路径跟随控制方案, 该方案采用模糊方法来模拟人驾车时的思维方式。文献[3]基于平面平和虚拟车辆的基础上提出了一种非完整移动机器人组沿着时变路径, 并且保持整体队形的路径跟随控制方案, 该方案在领导车的管理下, 避免相互碰撞并且实现了整体跟随。文献[4]分别将车体的航向



收稿日期: 2013-01-15 修回日期: 2013-04-18;
基金项目: 国家自然科学基金(61074087);
作者简介: 刘子龙(1972-), 男, 山东, 博士, 副教授, 研究方向为机器人控制; 胡少凯(1989-), 男, 湖北, 硕士生, 研究方向为机器人控制; 刘洁(1963-), 女, 吉林, 本科, 高工, 研究方向为信息检测。

<http://www.china-simulation.com>

• 2748 •

角的余弦值、正弦值与航向角的变化率的乘积也作为被控目标, 并且采用李雅普诺夫稳定性的证明方法, 证明了所采用的控制方法是全局渐进稳定的。文献[5]提出了一种多机器人协调控制策略, 将虚拟模型和路径跟随控制有机结合, 基于李雅普诺夫稳定性的证明和实验结果, 证明了该方法是正确和有效的。这些控制方案, 虽然经过了比较详尽的分析和论证, 得到了一定的控制效果, 其不足之处在于, 任何物体的运动都离不开其内在的动力学规律, 这种抛开动力学而只研究其运动学的方法, 不免致使其研究结果与实际效果存在着一定的出入。

采用动力学模型和运动学模型相结合的方法: 文献[6]采用了两层控制方案, 上层采用运动学控制方案, 下层采用动力学控制方案, 并兼顾了摩擦力等干扰的影响, 采用反馈线性化技术, 基于李雅普诺夫稳定理论和图论方法实现了多机器人路径跟随控制。文献[7]当轮胎存在滑移的情况下, 对车体路径跟随控制问题进行了研究, 采用峰间值和线性矩阵不等式的方法来减弱滑移角的影响。但是准确测量滑移角这在实际应用中难度较大。文献[8]采用了 35 规则的模糊控制器和分层滑膜控制相结合的方法实现了球形机器人跟踪控制。文献[9]针对动态模型和参数不确定的情况, 基于神经网络在线学习方法, 设计了一种鲁棒自适应反步控制器。由于车体的动力学模型, 尤其是车轮所感受到的摩擦力为时变、非线性的, 且难于测量, 致使这些控制方案制定困难, 控制效果不理想。

文献[10-11]采用了电机模型和运动学模型相结合的方法: 文献[10]设计了一种基于单神经元自适应轨迹跟踪控制方法, 该方法兼顾了车体动力学系统的结构和里程计及轮驱动系统动态特性, 不仅能够克服车体质量变化, 还克服了参数不确定性给控制效果带来的不利影响。文献[11]采用了反步设计法来设计自适应跟踪控制方案, 采用径向基函数神经网络来逼近轮胎所感受到的摩擦力, 进而补偿其带来的不利影响。但是, 这两篇文献均只是将驱动电机模型视为力输出模型, 这不免有些牵强。

文献[12]基于移动机器人的驱动方程, 采用 RBF 神经网络在线逼近驱动方程时变不确定的摄动部分, 将逼近结果加入到控制器中, 进而采用反馈线性化的方法实现了位置跟踪控制, 由于神经网络学习率的问题, 致使神经网络存在着一定的收敛时间, 最终使得跟踪效果的过渡过程时间较长。

本文将直流电机驱动的轮式移动机器人视为由电机驱动方程和车体运动学方程所组成的级联系统: 将车体视为驱动电机的负载, 驱动电机的输出转速作为车体运动学模型的输入。将在线辨识所得的驱动电机时变不确定参数, 及在运动学方程中求取的与目标位姿的误差反馈至驱动方程的控制器中, 进而设计出反馈线性化路径跟随控制方案, 该控制方案即使在目标车体纵向速度、航向角时变的情况下, 均得到了较好的跟随效果, 较好的克服了驱动模型中时变、不确定参数给控制效果带来的不良影响, 基于李雅普诺夫稳定性的证明和仿真结果证明了该方法的正确性和有效性。

1 系统模型

三轮式移动机器人在平面直角坐标系内的模型, 如图 1 所示。

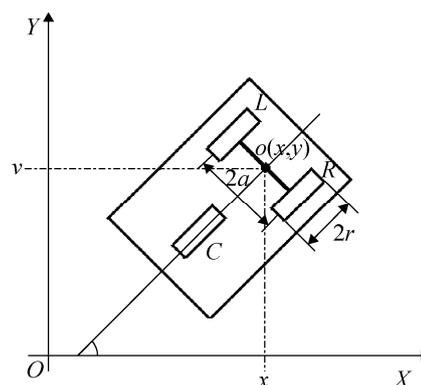


图 1 移动机器人模型示意图

其中: 轮 R , L 为驱动轮, 两轮转速的不同组合, 将改变移动机器人的运动速度的大小和方向, 两轮间轴向距离为 $2a$; 轮 C 为辅助轮, 只是起到支撑作用; 所有车轮的半径为 r ; 车体正向与坐标系内的 X 轴正向夹角为航向角 θ ; 被控点是轮 R , L 的

中心点 o ，其坐标为 $o(x, y)$ 。

目前，在轮式移动机器人控制系统结构中，关于运动学方程、动力学方程、驱动方程之间的关系常按图 2 所示。

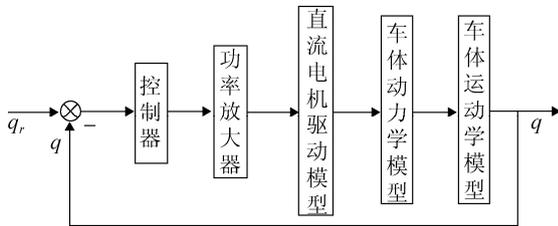


图 2 系统结构图

由图可知：控制器的输出经功率放大器放大后，作为直流电机的输入，直流电机在得到输入的电压、电流信号后驱动电机的输出轴转动，进而带动移动机器人按其动力学的内在关系产生运动，由于动力学所产生的轨迹过程符合其运动学模型，通过求解运动学方程，得出移动机器人的运动位姿与期望位姿的差值，将这个差值反馈至控制器中。

移动机器人的驱动执行器是直流电机，车体相对于电机来说是负载，在不同的路况下，根据不同的控制目标要求，多个驱动电机协调转动，从而带动车体做出相应的运动，从这个角度来说，移动机器人的运动控制应该是多电机的协调控制。

那么，依据此观点，移动机器人系统结构图就应该改为如图 3 所示。

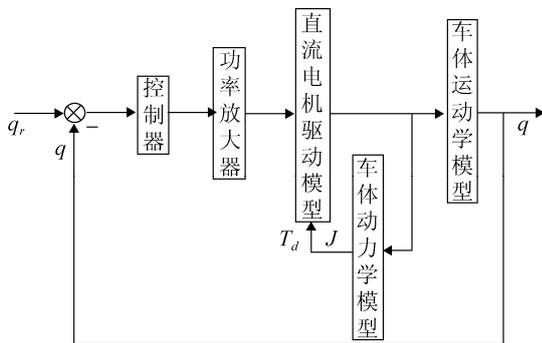


图 3 系统结构图

由图可知，控制器的输出信号经过功率放大器放大后，作为直流电机的输入，直流电机在得到输入的电压、电流信号后输出驱动力矩，驱动

车体的动力学模型，同时电机的转动角度、速度等量符合机器人运动学方程，通过求解机器人运动学方程得出其实际运动位姿与期望位姿的差值，将该差值反馈至控制器中。

1.1 运动学方程

基于非完整约束的轮式移动机器人车体运动学方程如下所述：

$$\dot{x}(t) = v(t) \cos(\theta(t)) = \frac{\omega_L(t)r + \omega_R(t)r}{2} \cos(\theta(t)) \quad (1)$$

$$\dot{y}(t) = v(t) \sin(\theta(t)) = \frac{(\omega_L(t)r + \omega_R(t)r)}{2} \sin(\theta(t)) \quad (2)$$

$$\dot{\theta}(t) = \omega(t) = \frac{(\omega_R(t)r - \omega_L(t)r)}{2a} \quad (3)$$

其中： $v(t)$ 为车体纵向速度； $\omega(t)$ 为车体转动角速度； $\omega_R(t)$ 、 $\omega_L(t)$ 为车体右、左轮转动角速度； r 为车轮转动半径。

1.2 驱动方程

因为采用直流电机驱动，直流电机方程为：

$$J_R(t)\dot{\omega}_R(t) + F\omega_R(t) + T_{dR}(t) = K_T i_R(t) \quad (4)$$

$$L\dot{i}_R(t) + R i_R(t) + K_e \omega_R(t) = u_R(t) \quad (5)$$

$$J_L(t)\dot{\omega}_L(t) + F\omega_L(t) + T_{dL}(t) = K_T i_L(t) \quad (6)$$

$$L\dot{i}_L(t) + R i_L(t) + K_e \omega_L(t) = u_L(t) \quad (7)$$

其中：公式(4)、(6)为右、左轮驱动电机的力矩平衡方程；公式(5)、(7)为右、左轮驱动电机的电势平衡方程； $J_R(t)$ 、 $J_L(t)$ 负载折算到右、左轮驱动电机轴上的转动惯量； F 负载折算到电机输出轴上的粘性摩擦系数； K_T 电磁转矩系数； K_e 反电势系数，且 $K_e = \frac{\pi}{30} K_T$ ； $T_{dR}(t)$ 、 $T_{dL}(t)$ 右、左轮驱动电机受到的干扰力矩； L 电枢电感； R 电枢电阻； $i_R(t)$ 、 $i_L(t)$ 右、左轮驱动电机的电枢电流； $\omega_R(t)$ 、 $\omega_L(t)$ 右、左轮驱动电机轴转动的角速度；为突出问题的主要部分，这里将电机的输出轴至车轮间的传动比假设为 1。

因为驱动电机为系统的执行机构, 相对于系统整体来说, 其响应速度快, 则驱动电机模型可适当简化:

忽略电枢回路的电感, 则右、左轮驱动电机的动态方程为:

$$T_R(t)\dot{\omega}_R(t) + \omega_R(t) = K_1 u_R(t) - K_2 T_{dR}(t) \quad (8)$$

$$T_L(t)\dot{\omega}_L(t) + \omega_L(t) = K_1 u_L(t) - K_2 T_{dL}(t) \quad (9)$$

其中: $T_R(t) = RJ_R(t) / (RF + K_T K_e)$; $T_L(t) = RJ_L(t) / (RF + K_T K_e)$; $K_1 = K_T / (RF + K_T K_e)$; $K_2 = R / (RF + K_T K_e)$ 。

则系统模型可由公式(1), (2), (3), (8), (9)来描述, 车体的动力学模型折算到驱动电机中, 则为电机的力矩平衡方程, 电机方程输出的转速驱动机器人的运动学方程, 可见该系统为级联系统。

式(8), (9)中的转动惯量 $J(t)$ 和负载干扰力矩 $T_d(t)$ 随着车体的运动状态和路况的变化而变化, 即存在时变性, 这给控制方案的制定带来了困难。

2 控制器设计

控制的目的是移动机器人跟随其理想运动学轨迹, 理想运动学模型为:

$$\dot{x}_d(t) = v_d(t) \cos(\theta_d(t)) \quad (10)$$

$$\dot{y}_d(t) = v_d(t) \sin(\theta_d(t)) \quad (11)$$

$$\dot{\theta}_d(t) = \omega_d(t) \quad (12)$$

取状态向量为 $q_d(t) = [x_d(t) \ y_d(t) \ \theta_d(t)]$, 在驱动方程(8), (9)中寻找合适的控制向量 $u(t) = [u_R(t) \ u_L(t)]$, 使得实际移动机器人的状态向量 $q(t)$ 跟随 $q_d(t)$, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} (q_d(t) - q(t)) = 0$ 。

为了便于跟随控制器的设计, 将在平面直角坐标系内的移动机器人运动位姿与理想位姿的误差转换到移动机器人的载体坐标系内^[13]:

$$\begin{bmatrix} x_e(t) \\ y_e(t) \\ \theta_e(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta(t)) & \sin(\theta(t)) & 0 \\ -\sin(\theta(t)) & \cos(\theta(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d(t) - x(t) \\ y_d(t) - y(t) \\ \theta_d(t) - \theta(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

将上式两侧对时间求导得:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e(t) \\ \dot{y}_e(t) \\ \dot{\theta}_e(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega(t)y_e(t) - v(t) + v_d(t)\cos(\theta_e(t)) \\ -\omega(t)x_e(t) + v_d(t)\sin(\theta_e(t)) \\ \omega_d(t) - \omega(t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

在运动学模型内, 选择控制器的输入为:

$$\begin{bmatrix} v_c(t) \\ \omega_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d(t)\cos(\theta_e(t)) + K_{x_e}x_e(t) \\ \omega_d(t) + K_{y_e}v_d(t)y_e(t) + K_{\theta_e}K_{y_e}\sin(\theta_e(t)) \end{bmatrix} \quad (15)$$

则, 定义正定李雅普诺夫函数为:

$$V(t) = \frac{1}{2}(x_e^2(t) + y_e^2(t)) + \frac{(1 - \cos(\theta_e(t)))}{K_{y_e}} \quad (16)$$

对上式两侧求导得:

$$\dot{V}(t) = \dot{x}_e(t)x_e(t) + \dot{y}_e(t)y_e(t) + \frac{\dot{\theta}_e(t)\sin(\theta_e(t))}{K_{y_e}}$$

与公式(14), (15)联列, 且取 $v(t) = v_c(t)$, $\omega(t) = \omega_c(t)$, 得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= (\omega_c(t)y_e(t) - v_c(t) + v_d(t)\cos(\theta_e(t)))x_e(t) + \\ & \quad (-\omega_c(t)x_e(t) + v_d(t)\sin(\theta_e(t)))y_e(t) + \\ & \quad (\omega_d(t) - \omega_c(t))\frac{\sin(\theta_e(t))}{K_{y_e}} = \\ & \quad (-v_c(t) + v_d(t)\cos(\theta_e(t)))x_e(t) + \\ & \quad (v_d(t)\sin(\theta_e(t)))y_e(t) + (\omega_d(t) - \omega_c(t)) \\ & \quad \frac{\sin(\theta_e(t))}{K_{y_e}} = -K_{x_e}x_e^2(t) - K_{\theta_e}\sin^2(\theta_e(t)) \leq 0 \quad (17) \end{aligned}$$

可见在运动学模型中, 若取公式(15)为控制量, 则 $\lim_{t \rightarrow \infty} (q_d(t) - q(t)) = 0$ 。

但实际需求是, 在驱动模型内输入控制量 $u(t) = [u_R(t) \ u_L(t)]$, 使得驱动方程输出的转速驱动运动学模型, 致使在运动学模型中 $\lim_{t \rightarrow \infty} (q_d(t) - q(t)) = 0$ 。

则由公式(1)~(3)得:

$$v(t) = \frac{\omega_L(t)r + \omega_R(t)r}{2} \quad (18)$$

$$\omega(t) = \frac{\omega_R(t)r - \omega_L(t)r}{2a} \quad (19)$$

当运动学模型控制器输入为公式(15)的 $[v_c(t) \ \omega_c(t)]^T$ 时, 则相应的右、左轮输出的角速度应该为:

$$\omega_{Rc}(t) = \frac{v_c(t) + \omega_c(t)a}{r} \quad (20)$$

$$\omega_{Lc}(t) = \frac{v_c(t) - \omega_c(t)a}{r} \quad (21)$$

为使右轮输出的实际角速度为式(20), 则由电机驱动模型公式(8)得

$$\dot{\omega}_R(t) = \frac{K_1 u_R(t) - K_2 T_{dR}(t) - \omega_R(t)}{T_R} \quad (22)$$

$$\text{进而, 取 } \dot{\omega}_R(t) = \frac{K_1 u_R(t) - K_2 T_{dR}(t) - \omega_R(t)}{T_R} = \dot{\omega}_{Rc}(t) + K_{\omega_R}(\omega_{Rc}(t) - \omega_R(t)) \quad (23)$$

其中: K_{ω_R} 为常数。

$$\text{则 } \dot{\omega}_R(t) = \dot{\omega}_{Rc}(t) + K_{\omega_R}(\omega_{Rc}(t) - \omega_R(t))$$

$$\dot{\omega}_{Rc}(t) - \dot{\omega}_R(t) + K_{\omega_R}(\omega_{Rc}(t) - \omega_R(t)) = 0$$

$$\text{取 } e_{\omega_R}(t) = \omega_{Rc}(t) - \omega_R(t), \text{ 则上式变为 } \dot{e}_{\omega_R}(t) + K_{\omega_R} e_{\omega_R}(t) = 0. \text{ 其时域解为: } e_{\omega_R}(t) = e_{\omega_R}(0) e^{-K_{\omega_R} t}, \text{ 当 } K_{\omega_R} > 0 \text{ 时, } \lim_{t \rightarrow \infty} e_{\omega_R}(t) \rightarrow 0, \text{ 可见, 当 } u_R(t) = \frac{[\dot{\omega}_{Rc}(t) + K_{\omega_R}(\omega_{Rc}(t) - \omega_R(t))] \cdot T_R + \omega_R(t) + K_2 T_{dR}(t)}{K_1} \quad (24)$$

时, 代入公式(22), 可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\omega}_R(t) \rightarrow 0$ 。

从而, 右轮实际输出的角速度为:

$$\omega_R(t) = \omega_{Rc}(t) - e_{\omega_R}(t) = \omega_{Rc}(t) - e_{\omega_R}(0) e^{-K_{\omega_R} t}.$$

因为公式(24)中的 $J_R(t)$, $T_{dR}(t)$ 随着车体运动状态和路况的不同而变化, 且难于测量, 致使公式(24)中 $u_R(t)$ 不易得到。

由公式(5)得:

$$[\dot{i}_R(t) \ i_R(t) \ \omega_R(t)] \begin{bmatrix} L \\ R \\ K_e \end{bmatrix} = u_R(t) \quad (25)$$

由于变量 $\dot{i}_R(t)$, $i_R(t)$, $\omega_R(t)$, $u_R(t)$ 可测, 由最小二乘法, 剔除奇异点后, 可在线辨识出参数 $K_e(t)$, 又由于 $K_e(t) = \frac{\pi}{30} K_T(t)$, 则可在线得到 $K_T(t)$ 。

由公式(4)得:

$$[\dot{\omega}_R(t) \ \omega_R(t) \ 1] \begin{bmatrix} J_R \\ F \\ T_{dR} \end{bmatrix} = K_T i_R(t) \quad (26)$$

可知: $K_T(t)$ 已得, $\dot{\omega}_R(t)$, $\omega_R(t)$, $i_R(t)$ 可测, 则 $T_{dR}(t)$, $J_R(t)$ 由最小二乘法, 在剔除奇异点后, 可在线辨识得到。

将辨识结果代入公式(24), 即可得到 $u_R(t)$ 。

同理:

取 $e_{\omega_L}(t) = \omega_{Lc}(t) - \omega_L(t)$, 则当

$$u_L(t) = \frac{[\dot{\omega}_{Lc}(t) + K_{\omega_L}(\omega_{Lc}(t) - \omega_L(t))] \cdot T_L + \omega_L(t) + K_2 T_{dL}(t)}{K_1} \quad (27)$$

时, 随着时间的增长, $\lim_{t \rightarrow \infty} e_{\omega_L}(t) \rightarrow 0$ 。

采用公式(25), (26)的方法可在线辨识 $J_L(t)$, $T_{dL}(t)$ 。

则左轮实际输出的角速度为: $\omega_L(t) = \omega_{Lc}(t) - e_{\omega_L}(t) = \omega_{Lc}(t) - e_{\omega_L}(0) e^{-K_{\omega_L} t}$ 。

则实际输入至运动学模型的 $v(t)$, $\omega(t)$ 为

$$v(t) = \frac{r(\omega_L(t) + \omega_R(t))}{2} = \frac{r(\omega_{Lc}(t) + \omega_{Rc}(t))}{2} - \frac{r(e_{\omega_R}(0)e^{-K_{\omega_R} t} + e_{\omega_L}(0)e^{-K_{\omega_L} t})}{2} = v_c(t) - \frac{r(e_{\omega_R}(0)e^{-K_{\omega_R} t} + e_{\omega_L}(0)e^{-K_{\omega_L} t})}{2} \quad (28)$$

$$\omega(t) = \frac{(\omega_R(t)r - \omega_L(t)r)}{2a} = \frac{r(\omega_{Rc}(t) - \omega_{Lc}(t))}{2a} - \frac{r(e_{\omega_R}(0)e^{-K_{\omega_R} t} - e_{\omega_L}(0)e^{-K_{\omega_L} t})}{2a} = \omega_c(t) - \frac{r(e_{\omega_R}(0)e^{-K_{\omega_R} t} - e_{\omega_L}(0)e^{-K_{\omega_L} t})}{2a} \quad (29)$$

则将 $J_R(t)$, $T_{dR}(t)$, $J_L(t)$, $T_{dL}(t)$ 的辨识结果, 及公式(14), (15), (24), (27), (28), (29)代入公式(16)后, 对其求导得:

$$\dot{V}(t) = \dot{x}_e(t)x_e(t) + \dot{y}_e(t)y_e(t) +$$

$$\frac{\dot{\theta}_e(t)\sin(\theta_e(t))}{K_{y_e}} = \frac{r}{2}(e^{\omega_R(0)}e^{-K_{\omega_R}t} + e^{\omega_L(0)}e^{-K_{\omega_L}t})x_e(t) + \frac{r}{2a}(e^{\omega_R(0)}e^{-K_{\omega_R}t} - e^{\omega_L(0)}e^{-K_{\omega_L}t})\frac{\sin(\theta_e(t))}{K_{y_e}} - K_{x_e}x_e^2(t) - K_{\theta_e}\sin(\theta_e^2(t)) \quad (30)$$

可见, 适当选取 $K_{\omega_R}, K_{\omega_L}, K_{x_e}, K_{y_e}, K_{\theta_e}$ 的值, 即可使上式小于零。即使当 $e_{\omega_R}(0), e_{\omega_L}(0)$ 较大时, 使得 $t \in (0, t_T)$ 在有限时间段内, 式(30)的值可能大于 0, 但是由于 $e^{-K_{\omega_R}t}, e^{-K_{\omega_L}t}$ 收敛速度很快, 当 $t \geq t_T$ 后, 式(30)小于等于 0, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} (q_d(t) - q(t)) = 0$ 。

3 系统仿真

电机参数初始值:

$$L = 0.4 \times 10^{-3} H; R = 3.65 \Omega; J = 0.155 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; K_e = 0.262 \text{ V} / (\text{rad} / \text{s}); K_T = 2.5 \text{ Nm} / \text{A}; F = 0.001。$$

驱动电机的控制电压 $|u| \leq 15 \text{ V}$ 。

车体参数: 长度 $L=0.3 \text{ m}$; 宽度 $W=0.18 \text{ m}$; 车轮半径 $r=0.05 \text{ m}$; 两驱动轮轴间距 $2a=0.14 \text{ m}$ 。

参考车体纵向速度:

$$v_d(t) = 0.5 \sin(0.04\pi \times t) \text{ m} / \text{s}。$$

参考车体转动角速度:

$$\omega_d(t) = 0.2 \times \pi \times \sin(0.125 \times \pi t) \text{ rad} / \text{s}。$$

平面直角坐标系内:

$$\text{目标初始位姿: } x_d(0) = 100 \text{ m}, y_d(0) = 100 \text{ m},$$

$$\theta_d(0) = 0 \text{ rad};$$

$$\text{小车实际初始位姿: } x(0) = 100.2 \text{ m},$$

$$y(0) = 100.2 \text{ m}, \theta(0) = 0.2 \text{ rad};$$

控制器参数为:

$$\text{公式(15)中, 取 } K_{x_e} = 1; K_{y_e} = 5; K_{\theta_e} = 1;$$

车体的左、右轮驱动电压如公式(24), (27)所示, 其中 $K_{\omega_R} = 1000, K_{\omega_L} = 1000$;

$$\text{采样周期 } T_S = 0.03 \text{ s};$$

为了说明本文所述控制方法的有效性, 这里将与文献[12]所述控制效果进行比较, 所得仿真曲线, 如图 4~11 所示。

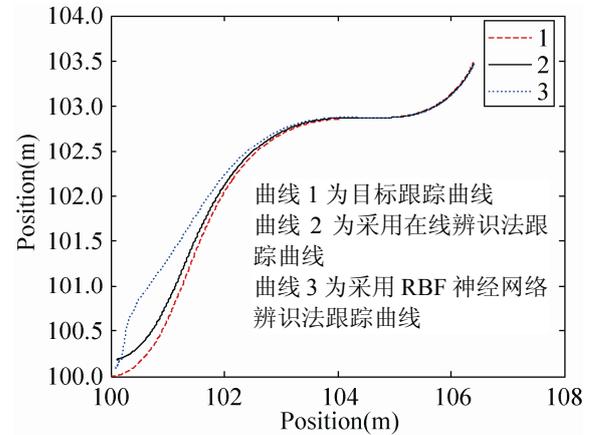


图 4 平面位置跟随曲线

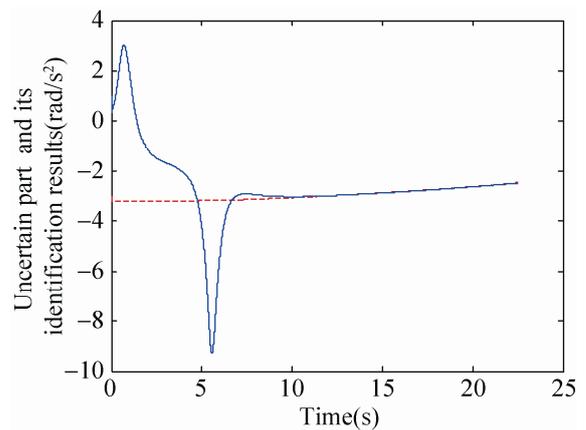


图 5 左侧驱动电机不确定部分及其神经网络辨识结果

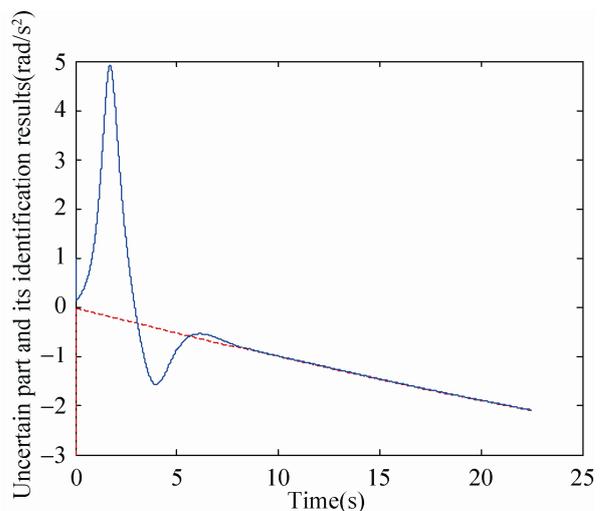


图 6 右侧驱动电机不确定部分及其神经网络辨识结果

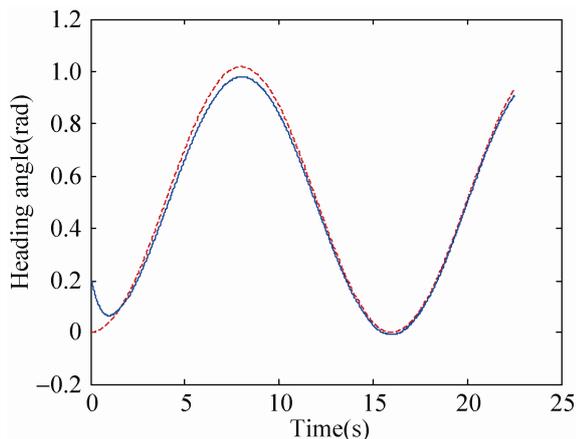


图 7 航向角及其跟随曲线

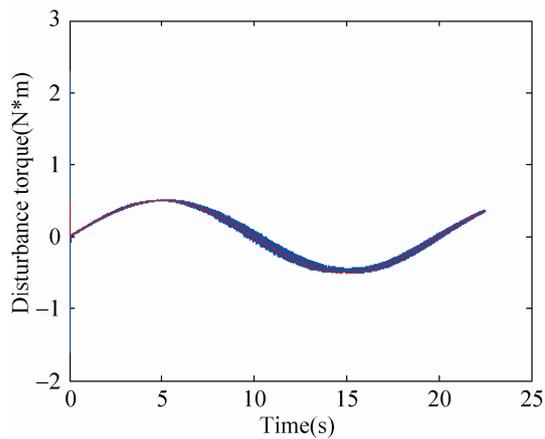


图 10 左驱动轮所受干扰力矩及其辨识结果

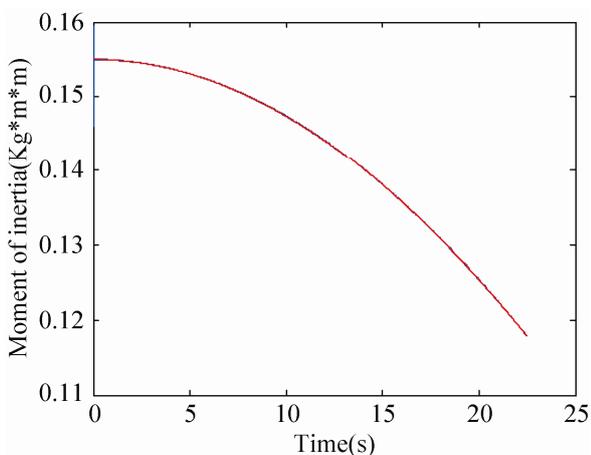


图 8 左驱动轮转动惯量及其辨识结果

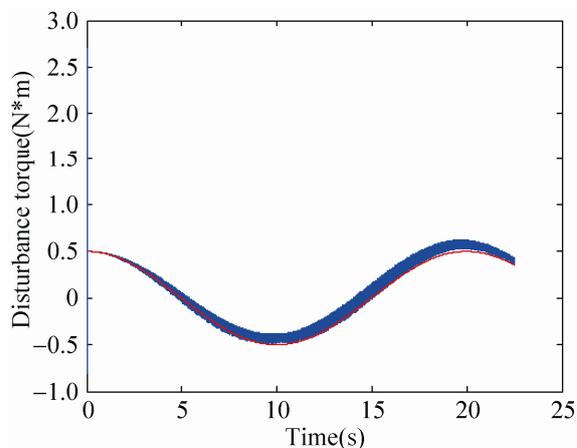


图 11 右驱动轮所受干扰力矩及其辨识结果

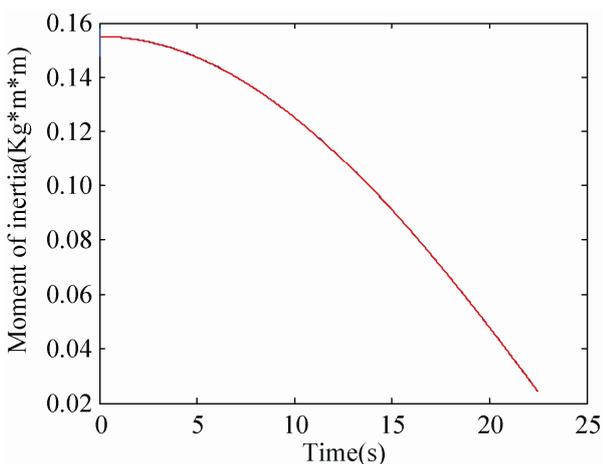


图 9 右驱动轮转动惯量及其辨识结果

图 5, 6 为采用文献[12]所述控制方法, 神经网络辨识驱动电机摄动部分结果, 可见过渡过程需 10 秒左右, 这一过渡过程时间致使将辨识结果加入到后续的反馈线性化控制器中, 跟踪理想轨迹过渡过程时间较长, 如图 4 中曲线 3 可知跟踪的动态特性并不理想。

从图 8~11 可知, 采用最小二乘法能够有效地在线辨识出驱动电机方程中的时变、不确定参数, 实时性很强, 即使目标车体在纵向速度、转动角速度时变的情况下, 由图 4 曲线 2 和图 7 可知, 采用该控制方案使得移动机器人在位置和姿态上均实现了较好的路径跟随, 动态特性好, 稳态精度高。

4 结论

由电机驱动的移动机器人控制问题, 常按图 2

所示,即将电机驱动模型的输出来驱动车体动力学模型,动力学模型的运行轨迹符合车体运动学模型,本文根据电机驱动的移动机器人内在相互关系,将车体看作驱动电机的负载,车体所受到的阻力,折算到电机输出轴上,被当作输出轴所受到的干扰力矩,进而设计成如图 3 所示的反馈式系统结构。

直流电机的时变参数辨识问题,一直以来引起了学者们的广泛注意。本文基于最小二乘法,由公式(25)首先辨识出 $K_e(t)$, 然后根据 $K_e(t) = (\pi/30) \times K_T(t)$, 计算得到 $K_T(t)$, 进而根据公式(26)最终在线得到 $J(t)$ 和 $T_d(t)$, 最小二乘法具有快速性、实时性,为下一步控制效果良好打下了基础。

这些正是本文主要的创新点。

本文基于系统结构图 3, 设计了移动机器人级联反馈线性化路径跟随控制方案,上层基于车体运动学模型,设计出理想控制速度,下层基于车体动力学模型,采用最小二乘法在线辨识驱动模型中的时变参数,设计反馈线性化跟踪控制方案,来跟踪理想控制速度,进而实现车体的路径跟随,该方法简单有效、实时性强,稳态精度高,即使在目标车体纵向速、航向角时变的情况下,均实现了较好的控制效果,理论证明和仿真结果证明了这一点。

输入驱动电机的电功率是有限的,这会给移动机器人跟随效果带来不利影响,兼顾驱动电机输入受限,进而制定更加简单有效的跟随控制方案是今后研究的重点。

参考文献:

- [1] Morro A, Sgorbissa A, Zaccaria R. Path Following for Unicycle Robots with an Arbitrary Path Curvature Robotics [J]. IEEE Transactions on Volume (S1552-3098), 2011, 27(5): 1016-1023.
- [2] Mehrjerdi H, Saad M, Ghommam J. Hierarchical. Fuzzy Cooperative Control and Path Following for a Team of Mobile Robots Mechatronics [J]. IEEE/ASME Transactions on (S1083-4435), 2011, 16(5): 907-917.
- [3] Ailon A, Zohar I. Control Strategies for Driving a Group of Nonholonomic Kinematic Mobile Robots in Formation Along a Time-Parameterized Path Mechatronics [J]. IEEE/ASME Transactions on (S1083-4435), 2012, 17(2): 326-336.
- [4] Sašo Blažič. A novel trajectory-tracking control law for wheeled mobile robots [J]. Robotics and Autonomous Systems (S0921-8890), 2011, 59(11): 1001-1007.
- [5] Jawhar Ghommam, Hasan Mehrjerdi, Maarouf Saad, Faïçal Mnif. Formation path following control of unicycle-type mobile robots [J]. Robotics and Autonomous Systems (S0921-8890), 2010, 58(5): 727-736.
- [6] Ghommam J, Mehrjerdi H, Saad M, Mnif F. Adaptive coordinated path following control of non-holonomic mobile robots with quantised communication [J]. Control Theory & Applications, IET (S1751-8644), 2011, 5(17): 1990-2004.
- [7] Arogeti S A Berman. N Path Following of Autonomous Vehicles in the Presence of Sliding Effects Vehicular Technology [J]. IEEE Transactions on (S0018-9813), 2012, 61(4): 1481-1492.
- [8] Yao Cai, Qiang Zhan, Xi Xi. Path tracking control of a spherical mobile robot [J]. Mechanism and Machine Theory(S0094-114X), 2012, 51(5): 58-73.
- [9] Omid Mohareri, Rached Dhaouadi, Ahmad B Rad. Indirect adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot via neural networks [J]. Neurocomputing (S0925-2312), 2012, 88(7): 54-66.
- [10] Tamoghna Das, I N Kar, S Chaudhury. Simple neuron-based adaptive controller for a non-holonomic mobile robot including actuator dynamics [J]. Neurocomputing (S0925-2312), 2006, 69: 2140-2151.
- [11] 岳李勇, 谢巍. 含有驱动模型的移动机器人自适应跟踪控制 [J]. 控制理论与应用, 2008, 25(6): 1001-1006.
- [12] Gang Feng. A compensating scheme for robot tracking based on neural networks [J]. Robotics and Autonomous Systems (S0921-8890), 1995, 15(3): 199-200.
- [13] Y Kanayama, Y Kimura, F Miyazaki, *et al.* A stable tracking control method for an autonomous mobile robot [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Cincinnati, OH, USA, May 1990. USA: IEEE, 1990, 1: 384-389.