

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.05.014

基于自适应模糊滑模控制的机器人轨迹跟踪算法*

葛媛媛 张宏基

(榆林学院 现代设计与先进制造技术研究中心 榆林 719000)

摘要:针对控制参数的不确定性以及存在未知外部扰动情况下移动机器人的轨迹跟踪问题,提出一种基于光滑非线性饱和函数的自适应模糊滑模轨迹跟踪控制算法。通过建立不确定非线性移动机器人运动控制模型,利用自适应模糊逻辑系统构建自适应模糊滑模控制器。为了增强轨迹跟踪控制算法对随机不确定外部扰动适应能力的同时削弱滑模控制算法中的输入抖振现象,利用有界输入有界输出(BIBO)稳定的方法,通过带有自适应调节算法的模糊系统对滑模控制律中非线性函数项进行自适应逼近,并设计了模糊系统中可调参数的自适应控制律,保证了控制系统的稳定与收敛。实验结果表明,所设计的控制器对系统参数不确定性和外界扰动均具有较强的轨迹跟踪性能和鲁棒性。与传统的滑模控制算法相比,该算法不仅能有效减小输入抖振而且轨迹跟踪控制精度提高了18.89%。

关键词: 自适应滑模控制; 移动机器人; 轨迹跟踪; 模糊逼近; 非线性模型

中图分类号: TN401 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Trajectory tracking algorithm for robot based on adaptive fuzzy sliding mode control

Ge Yuanyuan Zhang Hongji

(Research Center for Contemporary Design and Advanced Manufacturing Technology, Yulin University, Yulin 719000, China)

Abstract: Aiming at the trajectory tracking of mobile robot with control parameter uncertainties and external disturbances, a trajectory tracking control algorithm based on smooth nonlinear saturation function adaptive fuzzy sliding mode is presented. The uncertain nonlinear motion control model of mobile robot is established using the adaptive fuzzy logic system constructed adaptive fuzzy sliding mode controller. Using the method of BIBO stability through the adaptive algorithm of fuzzy system for sliding mode control law in nonlinear function is adjusted by using adaptive approximation, therefore the adaptability of trajectory tracking control algorithm for stochastic uncertainty external disturbance is enhanced and the input chattering in sliding mode control algorithm is weakened. The stability and convergence of the control system are proven by using set up the fuzzy system adjustable parameter adaptive control law. The experimental results show that the adaptive fuzzy sliding mode controller is robust to parameter uncertainties and external disturbances. Compared with the traditional sliding mode control, the trajectory tracking algorithm not only can effectively reduce input chattering and tracking control precision is improved by 18.89%.

Keywords: adaptive fuzzy sliding mode control; mobile robot; trajectory tracking; fuzzy approximation; nonlinear model

1 引言

随着机器人智能化程度的不断提高,其应用领域也由民用、军用不断扩展到航空航天、宇宙探索、海洋开发

等领域。然而,当移动机器人在复杂未知环境下工作时,会出现很多环境信息未知的情况。由于实际工作环境的不确定性和复杂性,同时由于机器人的控制系统是一个多变量、强耦合、参数时变的多输入多输出非线性受控系统,难以用精确的数学模型来描述。属于典型的受非完

整约束的非线性控制系统,其控制系统在抗干扰能力和实时性等方面都面临着巨大的挑战^[14]。为了提高移动机器人的轨迹跟踪性能,很多方法被用来解决此问题,典型的有:反演控制法^[5]、滑模控制法^[6]、 H_∞ 鲁棒控制法^[7]、自适应控制法^[8]、神经网络控制、模糊控制等^[9]。其中,反演法易于与自适应控制技术相结合,能够消除机器人控制系统参数时变和外界扰动的影响,但却对所在环境的适应能力差。滑模控制(sliding mode control, SMC)是一种具有快速瞬态响应的鲁棒控制方案,可以有效地克服参数不确定性对控制系统的影响,但由于其自身的输入抖振问题会增加控制器的设计难度及降低系统的控制精度。因此,SMC方法首要解决的问题就是如何削弱系统的输入抖振。为此,Jin等人^[10]提出了时变滑模面的控制方法,该方法通过确保系统的相轨迹始终位于滑模面上,因此有效地削弱了输入抖振,但该方法没有考虑系统参数的不确定性问题。文献[11]考虑了电机动力学对整个移动机器人控制系统动力学特性的影响,首先将控制系统的输入/输出进行线性化处理,再运用高阶滑模控制器设计了机器人轨迹跟踪的鲁棒控制器。结果表明,该方法在一定程度也能够消除系统的输入抖振,且具有较好的鲁棒性。但由于未考虑控制系统参数摄动的影响,当机器人质量较大或移动速度较快时系统可能会出现不稳定情况。Chen等人^[12]针对不确定非线性控制系统提出一种基于系统状态范数的边界层在线调整算法,但该方法只对状态依赖的不确定性有效,当控制系统存在持续的外界干扰时,抑制抖振的效果不理想。Huang等人^[13]针对不确定非线性系统提出了一种自适应滑模控制方法,不仅使得控制系统具有鲁棒性且跟踪性能得到了保证,但关于系统状态能在有限时间内到达滑模面存在过度估计以及在离散情形下估计参数趋于无穷的缺陷。牛瑞燕等人^[14]针对非线性、强耦合的欠驱动两杆机械臂,提出了一种基于Hurwitz稳定判据的滑模控制方法。

为了有效解决动态复杂环境下机器人轨迹跟踪控制问题,本文首先建立了轮式移动机器人的不确定非线性系统模型,通过对模型方程的结构分析设计了一种自适应模糊滑模轨迹跟踪控制器(adaptive fuzzy sliding mode control, AFSMC)。通过自适应模糊控制来调节滑模控制算法的增益,能保证在有效消除滑模控制算法中的输入抖振的同时增强机器人轨迹跟踪时对随机不确定性因素干扰的适应能力。实验结果表明,该控制器对系统存在不确定性环境因素和参数扰动等情况时均具有良好的鲁棒性,与传统的滑模控制器(traditional sliding model control, TSMC)相比,其在有效地削弱了系统的控制输入抖振的同时提高移动机器人轨迹跟踪精度。

2 不确定非线性机器人模型

如图1所示,设绝对坐标系 XOY 固定在平面内,移动机器人的两个前轮为独立驱动轮,分别采用两台直流伺服电机独立驱动,并且可以通过调节各自伺服电机的输入电压以实现两前轮的速度差,两后轮为自由轮。由于控制执行系统不可避免的存在减速器齿轮间隙以及温度对电机参数的影响、车轮磨损等不确定性因素的存在都会引起控制系统传递力矩的变化。因此,在设计轨迹跟踪控制器的时候应该考虑电机及传动结构的驱动增益、电机时间常数的变化对轨迹跟踪的影响。

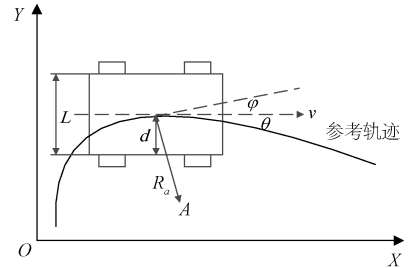


图1 机器人轨迹跟踪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of robot trajectory tracking

设点A为移动机器人运动控制的参考点,移动机器人两驱动轮间距离为 L ,跟踪方向角为 θ 。 d 、 φ 分别为移动机器人中心位置偏差和切向角(瞬时速度方向与轨迹之间的夹角)。由图1可知,移动机器人的转弯半径 R 为:

$$R = \frac{L(v_1 + v_2)}{2(v_1 - v_2)} \quad (1)$$

则两驱动轮中心点的线速度可表示为:

$$v_c = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (2)$$

式中: v_1 、 v_2 分别为左右两驱动轮的线速度。

设移动机器人在很短的时间间隔 Δt 内, θ 与 d 、 v 的变化量分别为 $\Delta\theta$ 、 Δd 、 $\Delta v(s)$,由图1的几何关系可知该变化量可被描述为:

$$\begin{cases} \Delta\theta = \frac{(v_2 - v_1)\Delta t}{R_a} \\ \Delta d = \frac{(v_1 + v_2)\Delta t}{2} \sin\Delta\theta \\ \Delta v(s) = \frac{v_1(s) - v_2(s)}{2} = \frac{k_s}{1 + T_m s} \Delta U(s) \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_s 为控制系统的驱动增益, T_m 为电机时间常数。 $v_1(s)$ 、 $v_2(s)$ 、 $U(s)$ 分别为左右两驱动轮线速度 v_1 、 v_2 以及伺服电机驱动电压 U 的Laplace变换。

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,式(3)可用如下的微分形式表示:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \frac{v_2 - v_1}{R_a} = -\frac{2}{R_a}\Delta v \\ d = \frac{(v_1 + v_2)}{2}\sin\theta = v_c \sin\theta \\ \Delta\dot{v}(t) = -\frac{1}{T_m}\Delta v(t) + \frac{k_s}{T_m}\Delta U(t) \end{cases} \quad (4)$$

设 $\mathbf{x} = [x_1 x_2 x_3]^T = [d\theta\Delta v]^T$, $U = [\Delta U]$ 。 Δk_s 、 ΔT_m 分别为驱动增益 k_s 和电机时间常数 T_m 随时间的变化量, w 为引进的外扰动信号。则由式(4)可得轨迹跟踪控制系统在 k_s 、 T_m 变化及外扰动 w 的存在的情况下移动机器人不确定非线性模型的一般表达式为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = v_c \sin x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{2}{R}x_3 \\ \dot{x}_3 = -\frac{1}{T_m + \Delta T_m}x_3 + \frac{k_s + \Delta k_s}{T_m + \Delta T_m}u + w \\ y = x_2 \end{cases} \quad (5)$$

由数学关系可知 $\frac{1}{x + \Delta x} = \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{1 + \Delta x/x}$, 在此将 $\frac{1}{1 + \Delta x/x}$ 看作 $\Delta x/x$ 的函数, 并对 $\frac{1}{1 + \Delta x/x}$ 在原点处进行 Taylor 展开后取其前两项有: $\frac{1}{x + \Delta x} \approx \frac{1}{x} \cdot (1 - \frac{\Delta x}{x})$ 式(5)可改写为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = v_c \sin x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{2}{R}x_3 \\ \dot{x}_3 = -\frac{1}{T_m}x_3 + \frac{\Delta T_m}{T_m^2}x_3 + \frac{k_s}{T_m}u + (\frac{\Delta k_s}{T_m + \Delta T_m} - \frac{\Delta T_m k_s}{T_m^2})u + w \\ y = x_2 \end{cases} \quad (6)$$

令:

$$d_1 = \frac{\Delta T_m}{T_m^2}x_3 + (\frac{\Delta k_s}{T_m + \Delta T_m} - \frac{\Delta T_m k_s}{T_m^2})u + w \quad (7)$$

式(7)表示轨迹跟踪控制系统由于自身参数变化及外部因素干扰产生总的不确定项。将式(6)简化为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = v_c \sin x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{2}{R}x_3 \\ \dot{x}_3 = -\frac{1}{T_m}x_3 + \frac{k_s}{T_m}u + d_1 \\ y = x_2 \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知:

$$\ddot{y} = \ddot{x} = \frac{2}{RT_m}x_3 - \frac{2k_s}{RT_m}u - \frac{2}{R}d_1 \quad (9)$$

由式(10)状态反馈控制律即可得式(11)所示的二阶系统, 其中该系统的输入为 v , 输出为 y 。

$$u = -\frac{RT_m}{2k_s}(v - \frac{2}{RT_m}x_3 + \frac{2}{R}d_1) \quad (10)$$

$$\ddot{y} = v \quad (11)$$

式(11)中, v 为新的控制系统输入且与系统的实际控制输入 u 之间满足单映射关系。

3 自适应模糊滑模控制器设计

滑模控制器由于引入了滑动模运动, 对于存在外部干扰因素以及自身参数变化的轨迹跟踪控制系统不仅具有很好的适应性和鲁棒性, 还能获得良好的轨迹跟踪动态性能。本文所设计的移动机器人轨迹跟踪控制系统就是使跟踪方向角为 θ 能够实时跟踪给定轨迹的切向角 φ , 同时尽可能满足 $d \rightarrow 0$ 的条件。

3.1 传统滑模控制

传统滑模控制过程可描述为从空间任意一点出发的状态轨迹, 能在特定时间内到达滑模面并在其上发生滑动模态运动, 最终达到平衡点的控制过程。设有如下 n 阶仿射非线性系统^[15]。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = f(\mathbf{x}, t) + b(\mathbf{x}, t)u \quad (12)$$

式中: $\mathbf{x} \in R, u \in R$ 为控制系统的输出量和输入量。 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in R^n$ 为控制系统的状态向量, $f(\mathbf{x}, t)$ 和 $b(\mathbf{x}, t)$ 是系统非线性未知动态函数且满足如下关系式:

$$\begin{cases} f(\mathbf{x}, t) = \hat{f}(\mathbf{x}, t) + \Delta f(\mathbf{x}, t) \\ b(\mathbf{x}, t) = \hat{b}(\mathbf{x}, t) + \Delta b(\mathbf{x}, t) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\hat{f}(\mathbf{x}, t)$ 是对系统非线性函数的估计, $|\Delta f(\mathbf{x}, t)| \leq \Delta f$ 是非线性系统的不确定性参数。 $b > 0$ 且为一已知常数, $0 < \Delta b(\mathbf{x}, t) < \Delta \bar{b}$ 是系统非线性控制增益的不确定性。且 $b(\mathbf{x}, t) \neq 0$, 假定 $b(\mathbf{x}, t) > 0$ 。设系统在具有不确定性外界因素和干扰存在的情况下状态 x_d 跟踪期望的轨迹满足:

$$\begin{cases} x_{d_i}(k+1) = x_{d_{i+1}}(k), i = 1, 2, \dots, n-1 \\ x_{d_n}(k+1) = \sum_{i=1}^n a_{i-1}x_{d_i}(k) + r(k) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $r(k)$ 为系统的有界输入信号, $a_{i-1} (i = 1, 2, \dots, n)$ 是 Hurwitz 多项式系数。则控制系统的跟踪误差可定义为 $e_i(k) = x_i(k) - x_{d_i}(k)$, $\mathbf{e}(k) = [e_1(k), e_2(k), \dots, e_n(k)]^T, i = 1, 2, \dots, n$ 。依据式(13)、(14)可得误差方程为:

$$\begin{cases} e_i(k+1) = e_{i+1}(k), i = 1, 2, \dots, n-1 \\ e_n(k+1) = f(x_i(k)) + g(x_i(k))u(k) - \sum_{i=1}^n a_{i-1}x_{d_i}(k) + r(k) \end{cases} \quad (15)$$

在轨迹跟踪控制系统的误差状态空间定义如下滑模

面方程:

$$s(t) = C^T e(t) \tag{16}$$

式中: $C = [a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, 1]^T \in R^n$, 为系数向量。对于初始条件 $e(0) = 0$, 轨迹跟踪控制问题可描述为当 $t \geq 0$ 时, 使控制系统的误差状态向量始终在滑模面 ($s = 0$) 上滑动。而保证控制系统的误差向量 $e(k)$ 轨迹到达滑模面 ($s = 0$) 的充要条件是通过选择式(12)中的控制系统的输入量 u , 使得下列关系式成立^[16]。

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta |s| \quad \eta > 0 \tag{17}$$

在满足上述条件的情况下滑模控制器可保证轨迹跟踪控制系统的收敛和稳定, 即当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e(k) \rightarrow 0$ 。式(12)所表示的非线性系统, 如果系统中未知动态函数 $f(x, t)$ 和 $b(x, t)$ 均已知, 则可选用式(18)所示的控制律使其满足条件式(17)。

$$u = g^{-1}(x, t) \left[- \sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} - f(x, t) + \dot{x}_d^{(n)} - k \operatorname{sgn}(s) \right] + b(x, t) u \tag{18}$$

式中: k 为切换增益系数。控制律(18)可用一般的形式表示为 $u = u_{eq} - u_{sw}$ 。其中:

$$\begin{cases} u_{eq} = b^{-1}(x, t) \left[- \sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} - f(x, t) + \dot{x}_d^{(n)} \right] \\ u_{sw} = b^{-1}(x, t) k \operatorname{sgn}(s) \end{cases} \tag{19}$$

式中: u_{eq} 为等效控制律, u_{sw} 为切换控制律。可以看出, 式(16)所示的滑模面方程只能确保系统状态空间中的运动点在有限时间内到达滑模面, 而对于到达过程中 ($s \neq 0$) 运动点的状态轨迹未作任何限制。因此, 需要通过采用合适的趋近律函数来改善滑模到达过程的动态性能。

3.2 模糊控制系统

模糊逻辑控制系统是由模糊化, 模糊规则基, 模糊推理机制和反模糊化4部分组成, 其中模糊系统的规则基可用 If-then 语句来描述:

$$R^j: \text{if } x_1 \text{ is } A_1^j \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_n^j \text{ then } y \text{ is } B^j \tag{20}$$

R^j 表示第 j 个模糊规则, $j = 1, 2, \dots, m$ 是模糊规则数。 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in U \in R^n$ 是模糊系统的输入, $u \in W \in R$ 是模糊系统的输出。 A_n^j, B^j 分别为论域 U 和 W 上定义的模糊语言值。

假设规则(20)中的模糊集 B^j 为标准模糊集, 其中心为 θ^j , 则反模糊化的模糊逻辑系统的输出为:

$$f(x) = \frac{\sum_{j=1}^m \theta^j \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i) \right)}{\sum_{j=1}^m \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i) \right)} \tag{21}$$

式中: $f: U \in R^n \rightarrow R$, $\mu_{A_i^j}(x_i)$ 是 A_i^j 的隶属度函数, $\theta^j (j = 1, 2, \dots, m)$ 为 B^j 的隶属度函数 $\mu_{B^j}(\theta_i)$ 取最大时

所对应的点, 在此假设 $\mu_{B^j}(\theta_i) = 1$ 。定义如式(22)所示的模糊基函数。

$$q_j(x) = \frac{\prod_{i=1}^m \mu_{A_i^j}(x_i)}{\sum_{j=1}^m \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i) \right)} \tag{22}$$

式中: $j = 1, 2, \dots, m$ 。将式(21)该写为如下形式:

$$f(x) = \theta^T q(x) \tag{23}$$

式中: $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)^T$, $q(x) = (q_1(x), q_2(x), \dots, q_m(x))^T$

3.3 自适应模糊滑模控制器

若采用传统的滑模控制, 要求控制律(18)中的 $f(x, t)$ 和 $b(x, t)$ 必须为已知的。但在实际控制系统中, $f(x, t)$ 和 $b(x, t)$ 一般都是未知的。因此, 本文根据模糊规则(20)及模糊基函数(22)和(23), 利用模糊控制系统的输出 $\hat{f}(x | \theta_f)$ 和 $\hat{b}(x | \theta_b)$ 来逼近系统动态未知函数 $f(x, t)$ 和 $b(x, t)$, 同时采用比例积分控制项来削弱滑模控制系统的输入抖振并提高控制系统稳态性能。连续比例积分控制器的输入和输出可表示为^[17]:

$$u_p = \theta_{p1} z_1 + \theta_{p2} z_2 \tag{24}$$

式中: $z_1 = s, \dot{z}_2 = s$, θ_{p1} 和 θ_{p2} 分别为待设计的控制增益, 将式(24)改写为:

$$\hat{p}(z | \theta_p) = \theta_p^T \phi(z) \tag{25}$$

式中: $\theta_p = [\theta_{p1}, \theta_{p2}] \in R^2$ 为可调参数向量, $\phi^T(z) = [z_1, z_2] \in R^2$ 为回归向量, 设计如下控制律:

$$u = \hat{b}(x | \theta_b) \left[- \sum_{i=1}^n c_i e^{(i)} - \hat{f}(x | \theta_f) + \dot{x}_d^{(n)} - \hat{p}(z | \theta_p) \right] \tag{26}$$

$$\begin{cases} \hat{f}(x | \theta_f) = \theta_f^T \xi(x) \\ \hat{b}(x | \theta_b) = \theta_b^T \xi(x) \\ \hat{p}(z | \theta_p) = \theta_p^T \phi(z) \end{cases} \tag{27}$$

为避免控制系统的输入抖振, 当系统状态位于边界层内 ($|s| < \Delta$) 时, 采用比例积分控制代替切换控制; 反之则系统的控制量保持在饱和值。因此, 当系统状态位于边界层外也即 ($|s| \geq \Delta$) 时, 设 $\hat{p}(z | \theta_p) = D + k$, 其中, Δ 为边界层厚度。设计自适应控制律为:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_f = r_1 s \xi(x) \\ \dot{\theta}_b = r_2 s \xi(x) u(t) \\ \dot{\theta}_p = r_3 s \phi(z) \end{cases} \tag{28}$$

式中: r_1, r_2, r_3 为调节速率, 其值均大于0。

为了保证控制系统参数有界, 根据投影算法对自适应控制律(28)作如下改进^[18]。对于 θ_j 采用:

$$\dot{\theta}_j = \begin{cases} r_j s \xi(x) & (|\theta_j| < M_j) \text{ or } (|\theta_j| = M_j \text{ and } s \theta_j^T \xi(x) \leq 0) \\ P_j [r_j s \xi(x)] & (|\theta_j| = M_j \text{ and } s \theta_j^T \xi(x) > 0) \end{cases} \tag{29}$$

对于 θ_b , 当 θ_b 中的某个元素满足 $\theta_{bi} = \varepsilon$ 时, 采用式 (30) 所示的形式, 否则采用式 (31) 来表示。

$$\dot{\theta}_{bi} = \begin{cases} r_2 s \xi(x) u(t), & s \xi_i(x) u(t) < 0 \\ 0, & s \xi_i(x) u(t) \geq 0 \end{cases} \quad (30)$$

式中: $\xi_i(x)$ 为 $\xi(x)$ 中的第 i 个元素。

$$\dot{\theta}_b = \begin{cases} r_2 s \xi(x) u(t), & (|\theta_b| < M_b) \text{ or} \\ (|\theta_b| = M_b \text{ and } s \theta_b^T \xi(x) u(t) \leq 0) \\ P_b [r_2 s \xi(x) u(t)], & (|\theta_b| = M_b \text{ and } s \theta_b^T \xi(x) u(t) > 0) \end{cases} \quad (31)$$

对于 θ_p 采用:

$$\dot{\theta}_p = \begin{cases} r_3 s \phi(z), & (|\theta_p| < M_p) \text{ or} \\ (|\theta_p| = M_p \text{ and } s \theta_p^T \phi(z) \geq 0) \\ P_p [r_3 s \phi(z)], & (|\theta_p| = M_p \text{ and } s \theta_p^T \phi(z) < 0) \end{cases} \quad (32)$$

式 (32) 中投影算子定义如下:

$$\begin{cases} P_f [r_1 s \xi(x)] = r_1 s \xi(x) - r_1 s \frac{\theta_f \theta_f^T \xi(x)}{|\theta_f|^2} \\ P_b [r_2 s \xi(x) u(t)] = r_2 s \xi(x) u(t) - r_2 s \frac{\theta_b \theta_b^T \xi(x) u}{|\theta_b|^2} \\ P_p [r_3 s \phi(z)] = r_3 s \phi(z) - r_3 s \frac{\theta_p \theta_p^T \phi(z)}{|\theta_p|^2} \end{cases} \quad (33)$$

所设计的自适应模糊滑模轨迹跟踪控制系统的整体结构如图 2 所示。

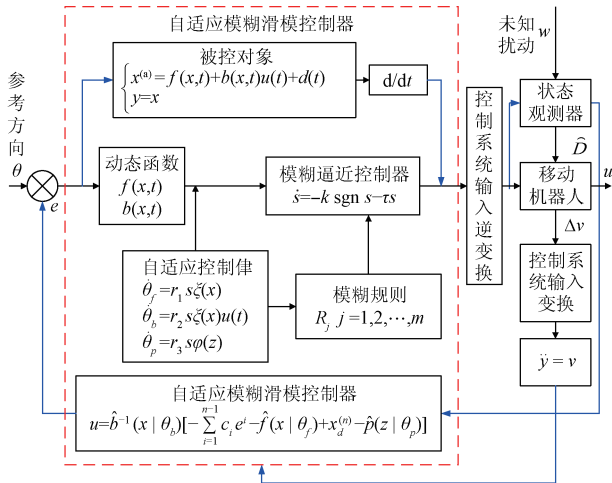


图 2 自适应模糊滑模控制整体结构

Fig. 2 Whole structure of adaptive fuzzy sliding mode control

4 实验验证

实验是在如图 3 所示四轮移动机器人上进行的。利

用该机器人自带的工控机作为上位机, 能够进行控制程序的编辑和执行, 采用可编程多轴控制器 (programmable multi axis controller, PMAC) 作下位机, 直接控制伺服驱动器驱动电机完成各种所需运动并监控运动过程中各状态量的变化。主要硬件组成及其功能如下。



图 3 四轮移动机器人

Fig. 3 Four-wheel mobile robot

技术参数: 最大载重 30 kg, 车体长、宽、高尺寸 900 mm × 720 mm × 330 mm;

执行机构: 由两套直流伺服系统组成, 每套伺服系统又分别由瑞士 Maxon 伺服电机、减速器和数字编码器其组成, 该直流伺服电机的工作电压是 48 V, 最大允许转速为 8 200 r/min, 空载转速为 7 580 r/min, 减速器的减速比 66:1, 数字编码器的最高工作频率为 320 kHz;

工控机 (IPC): 主要负责人机交互, 为用户提供一个可视化界面, 通过这一界面用户可以根据自己的要求来设定起始点, 运动参数 (如速度, 加速度, 位移等), 机器人可以自主进行运动控制, 根据传感器采集来的信息使机器人完成定位计算、实时路径规划和运动控制算法的实现;

运动控制驱动器 DTC0040: 主要是用来接受工控机所发出的指令, 将这些指令转换为控制电机转速的指令, 并将编码器反馈来的数据返回到工控机中, 实现一个闭环系统;

数据采集卡 USB7325B: 是用来收集各种传感器在实时环境中所采集到的信息, 并反馈给工控机。

机器人的物理参数如表 1 所示, 滑模控制器的参数为 $c_1 = 16, r_1 = 100, r_2 = 300, r_3 = 1\ 000, k = 5, \tau = 10$ 。

表 1 移动机器人物理参数表

Table 1 Physical parameters of mobile robot

参数符号	具体名称	标称值
T_m	电机时间常数	0.021 s
k_s	控制系统驱动增益	0.455/(V · s)
r	车轮半径	0.125 m
v_c	移动速度	2 m/min
n	减速器齿轮传动比	66

4.1 传统滑模控制

移动机器人轨迹跟踪运动的初始条件取为 $x(0) = [0.25, 0]$, 采样时间为 0.02 s 。采用式(18)所示的系统控制律, 并分别用 $\bar{f}(\mathbf{x}, t)$ 和 $\bar{b}(\mathbf{x}, t)$ 代替系统动态未知函数 $f(\mathbf{x}, t)$ 和 $b(\mathbf{x}, t)$, 则可得切换增益为:

$$k \geq \beta[(F + M + \eta) + (\beta - 1)|\bar{\mathbf{u}}|] \quad (34)$$

式中: $\eta = 0.01$ 。

图4~7所示为采用传统滑模控制时机器人位置的正弦轨迹跟踪响应。由图4机器人角位移的跟踪响应曲线图可知, 控制系统从静止到启动后的0.5 s内, 轨迹跟踪误差较大, 这是由于控制器的初始值与设置的初始值不同故而跟踪误差较大, 但随着时间的推移自适应律发挥调节作用, 使跟踪误差越来越小。从图5所示角位移跟踪误差曲线图可以看出, 整个轨迹跟踪过程的最大跟踪误差为 $19.164 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 。图6反应了传统滑模控制的输入抖振情况, 从系统输入控制函数图可知传统控制的输入抖振较为严重。图7所示为切换函数的变化曲线, 其在一定程度上也反映了控制系统输入抖振的变化情况。

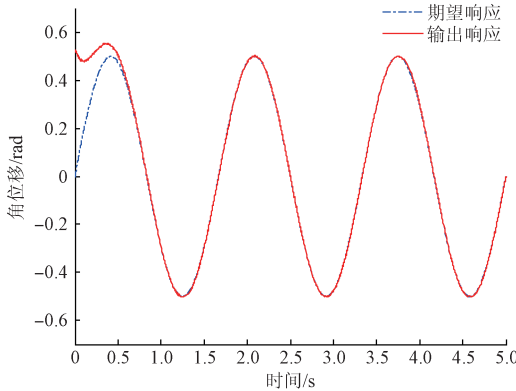


图4 传统滑模控制时移动机器人角位移跟踪响应

Fig. 4 The angular displacement tracking response of mobile robot with traditional sliding mode control

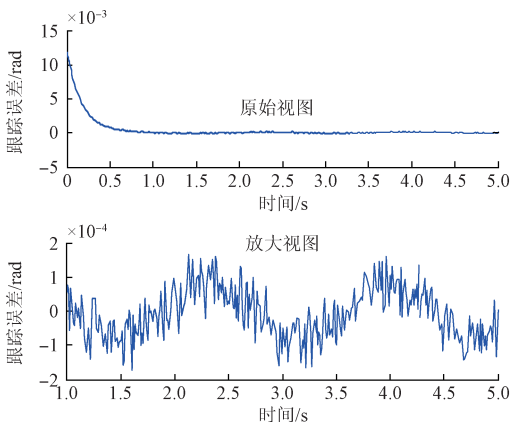


图5 传统滑模控制时移动机器人角位移跟踪误差

Fig. 5 The angular displacement tracking error of mobile robot with traditional sliding mode control

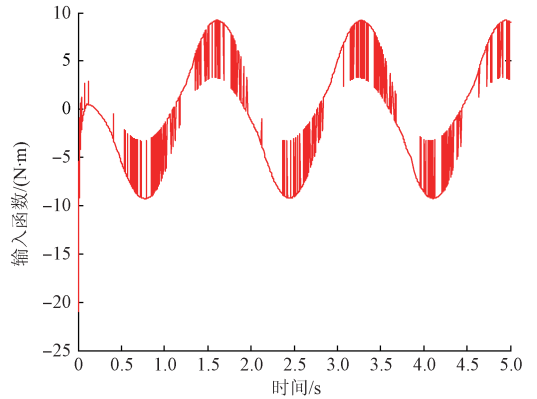


图6 传统滑模控制系统的输入函数

Fig. 6 Input function of the traditional sliding mode control system

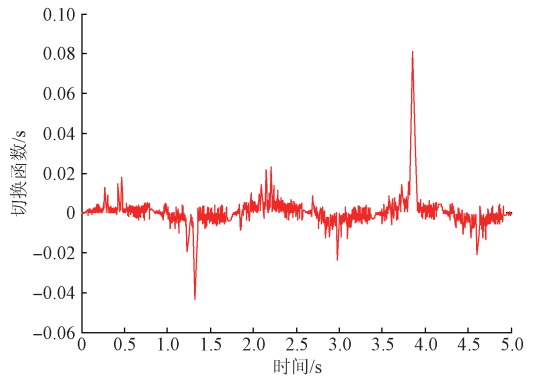


图7 传统滑模控制系统的切换函数

Fig. 7 Toggle function of the traditional sliding mode control system

4.2 自适应模糊滑模控制

与传统滑模控制取相同的滑模面方程以及初始条件和系统采样时间。而控制律则采用式(26)所示的控制律, 同时定义模糊系统的输入 x_i 和输出 y_j 的模糊集合均为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 对应的模糊变量分别为 $\{\text{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}\}$ 。其中, $i = 1, 2, j = 1, 2, \dots, m$ 各模糊集合对应的隶属函数分别为:

$$\begin{cases} \mu_{NB}(x_i) = \exp\{-[(x_i + \pi/4)/(\pi/24)]^2\} \\ \mu_{NM}(x_i) = \exp\{-[(x_i + \pi/6)/(\pi/24)]^2\} \\ \mu_{NS}(x_i) = \exp\{-[(x_i + \pi/12)/(\pi/24)]^2\} \\ \mu_{ZO}(x_i) = \exp\{-[x_i/(\pi/24)]^2\} \\ \mu_{PS}(x_i) = \exp\{-[(x_i - \pi/12)/(\pi/24)]^2\} \\ \mu_{PM}(x_i) = \exp\{-[(x_i - \pi/6)/(\pi/24)]^2\} \\ \mu_{PB}(x_i) = \exp\{-[(x_i - \pi/4)/(\pi/24)]^2\} \end{cases}$$

采用这49条模糊规则分别逼近非线性函数 $f(\mathbf{x}, t)$ 和 $b(\mathbf{x}, t)$ 。其中, $r_1 = 3, r_2 = 5, r_3 = 1, k = 5, \tau = 10$ 。

自适应模糊滑模控制法得到的实验结果如图 8 ~ 11 所示。图(8)为移动机器人角位移的跟踪响应曲线,由图可知同样存在初始跟踪误差较大的问题。由图 9 可知,采用自适应模糊滑模控制法的最大跟踪误差为 15.543×10^{-3} rad,与传统滑模控制算法相比,其最大跟踪误差减小了 18.89%。因为在该方法中,控制律能够在内部自适应模糊滑模控制器之间平稳切换,因此,其可有效削弱传统滑模控制的输入抖振,其输入控制函数和切换函数分别如图 10、11 所示。由图 10、11 可知,其输入控制函数和切换函数的幅值相比于传统滑模控制法都明显减小。

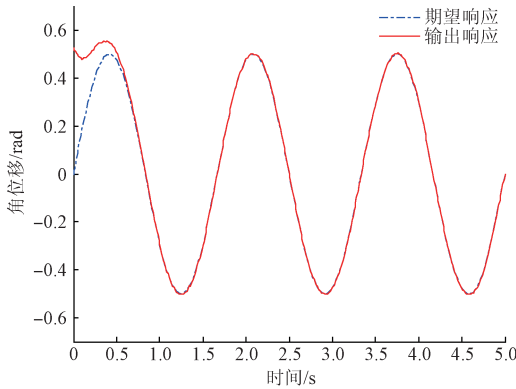


图 8 自适应模糊滑模控制控制时角位移跟踪响应
Fig. 8 The angular displacement tracking response of adaptive fuzzy sliding mode control

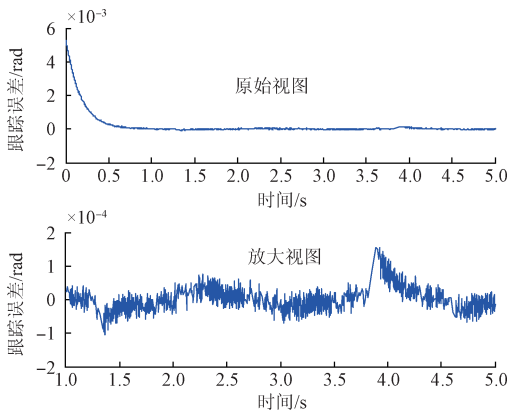


图 9 自适应模糊滑模控制时角位移跟踪误差
Fig. 9 The angular displacement tracking error of adaptive fuzzy sliding mode control

为了验证自适应模糊滑模算法在控制参数不确定性和外部扰动影响存在时的轨迹跟踪性能,采用存在连续转向、路径交叉等复杂情况的轨迹,同时随机加入高斯白噪声作为干扰信号。以此验证控制算法在控制参数不确定和外部扰动存在时算法的鲁棒性。在此,以两种不同

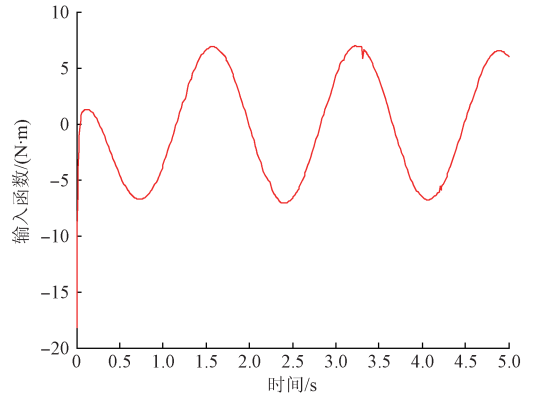


图 10 自适应模糊滑模控制系统的输入函数
Fig. 10 Input function of the adaptive fuzzy sliding mode control system

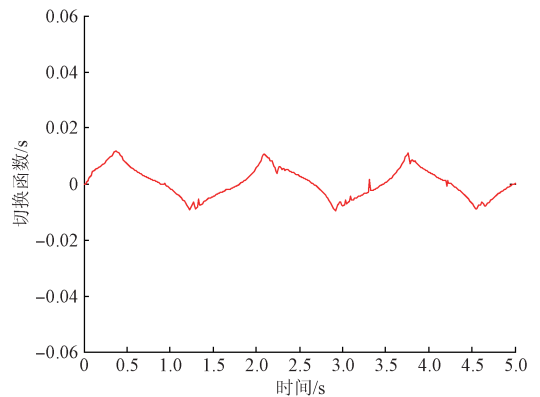


图 11 自适应模糊滑模控制系统的切换函数
Fig. 11 Toggle function of adaptive fuzzy sliding mode control system

轨迹情况下采用自适应模糊滑模控制算法进行实验,分别给出了两中曲线环境下移动机器人轨迹跟踪结果。图 12、13 所示分别为一般曲线环境和复杂曲线环境下移动机器人跟踪示意图。图14 ~ 17分别为两种曲线轨迹环

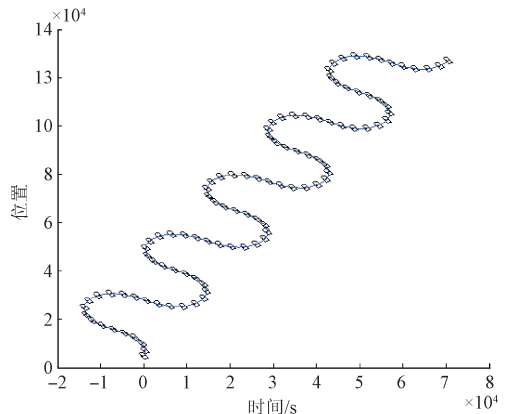


图 12 一般曲线环境时的跟踪情况
Fig. 12 Tracking situation in general environment

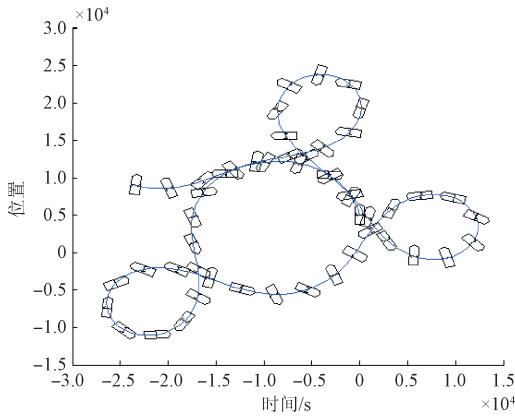


图 13 复杂曲线环境时的跟踪情况

Fig. 13 Tracking situation in complex environment

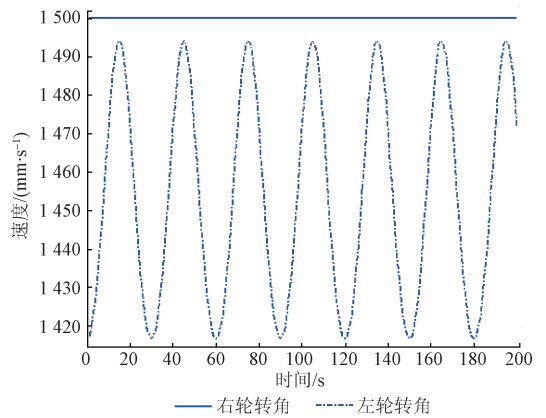


图 16 复杂曲线环境下跟踪时车轮速度变化曲线

Fig. 16 Wheel velocity change curve in complex environment tracking

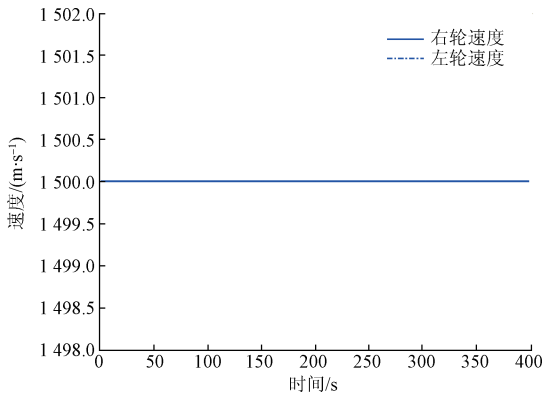


图 14 一般曲线环境下跟踪时车轮速度变化曲线

Fig. 14 Wheel velocity change curve in general environment tracking

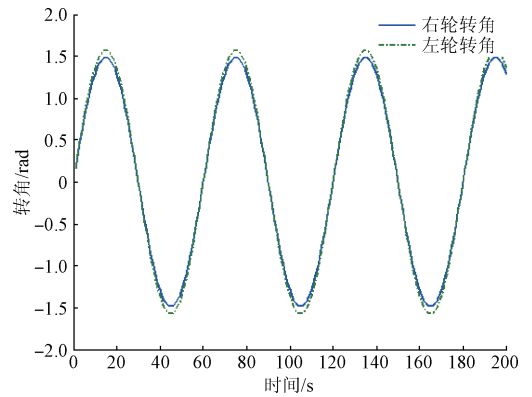


图 17 复杂曲线环境下跟踪时车轮转角变化曲线

Fig. 17 Wheel angle change curve in complex environment tracking

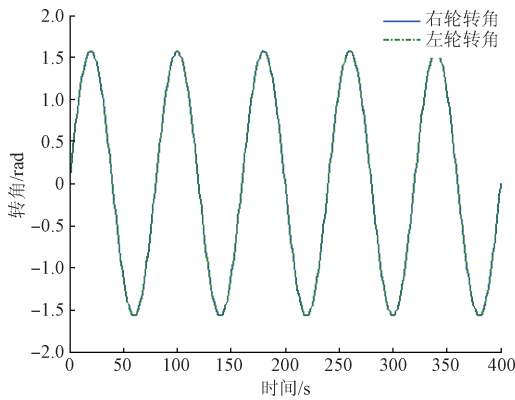


图 15 一般曲线环境下跟踪时车轮转角变化曲线

Fig. 15 Wheel angle change curve in general environment tracking

控制系统参数扰动以及非线性不确定性情况下移动机器人轨迹跟踪问题。同时该控制器能够有效地减小机器人位姿误差进而能够快速跟踪给定的轨迹。

5 结论

针对未知环境下移动机器人轨迹跟踪问题,考虑跟踪过程中存在不确定性因素和机器人控制系统参数扰动的情况,建立了移动机器人不确定非线性控制模型,设计了自适应模糊滑模控制器,最后在移动四轮机器人进行了轨迹跟踪实验验证。

基于机器人不确定性运动学模型,设计了自适应模糊滑模控制器,并设计了模糊系统中可调参数的自适应控制律,保证了轨迹跟踪控制系统的收敛性和稳定性。同时采用模糊系统对滑模控制律中非线性函数项进行自适应逼近,增强对随机不确定外部扰动的适应能力,以及输入抖振现象。

境下机器人车轮速度和转角变化曲线。从不同曲线环境下的轨迹跟踪曲线、车轮速度以及车轮转角变化情况可以看出,所设计的自适应模糊滑模控制器有效地解决了

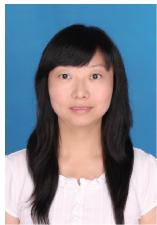
在设计滑模控制器时采用一种非线性积分滑模面的设计方法,使轨迹跟踪系统的鲁棒性得到改善。并且分析了初始条件对滑模稳态性能的影响,在此基础上使用全程非线性积分滑模控制方法,使轨迹跟踪控制系统具有较好的稳态性能和鲁棒性。

实验结果表明,与传统滑模控制算法相比,自适应模糊控制法对未知环境存在的不确定性和控制系统参数扰动等具有较强的鲁棒性,该控制器不仅有效减小滑模控制输入抖振,而且相比于传统滑模控制器,其轨迹跟踪精度提高了18.89%。

参考文献

- [1] 林文建, 钟杭, 黎福海, 等. 两轮自平衡机器人控制系统设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(8): 750-759.
LIN W J, ZHONG H, LI F H, et al. Design and implementation of control system for two-wheeled self-balancing robot [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(8): 750-759.
- [2] 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.
- [3] 王志林, 闻凯, 陈杰. 基于 Android 的小型移动机器人控制系统[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(9): 4-7.
WANG ZH L, WEN K, CHEN J. Small mobile robot control system based on Android [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(9): 4-7.
- [4] YUE M, HU P, SUN W. Path following of a class of non-holonomic mobile robot with under actuated vehicle body [J]. IET Control Theory and Applications, 2010, 4(10): 1898-1904.
- [5] DONG W, HUO W, TSO S K, et al. Tracking control of uncertain dynamic non-holonomic system and its application to wheeled mobile robots [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000, 16(6): 870-874.
- [6] PARK B S. Adaptive neural sliding mode control of non-holonomic wheeled mobile robots with model uncertainty [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(1): 207-214.
- [7] 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.
- [8] DONG W, KUHNERT D. Robust adaptive control of non-holonomic mobile robot with parameter and no parameter uncertainties [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(2): 261-266.
- [9] TOIBRRO J M, ROBERTI F, CARELLI R. Stable contour-following control of wheeled mobile robot [J]. Robotica, 2009, 27(1): 1-12.
- [10] JIN Y Q, LIU X D, QIN W, et al. Time-varying sliding mode control in rigid spacecraft attitude tracking [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21(4): 352-360.
- [11] 苏磊, 姚宏, 杜军. 不确定非线性系统自适应滑模跟踪控制及应用[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(4): 740-745.
SU L, YAO H, DU J. Adaptive sliding mode trajectory tracking control and its application in uncertain nonlinear systems [J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(4): 740-745.
- [12] CHEN M S, CHEN C H, YANG F Y. An LTR-observer-based dynamic sliding mode control for chattering reduction [J]. Automatica, 2007, 43(6): 1111-1116.
- [13] HUANG Y J, KUO T C, CHANG S H. Adaptive Sliding-Mode Control for Nonlinear System with Uncertain Parameters [J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 2008, 38(2): 534-539.
- [14] 牛瑞燕, 许午啸, 徐金琨. 欠驱动机械臂滑模控制与实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 348-355.
NIU R Y, XU W X, LIU J K. Sliding mode control and experiment study for under actuated manipulator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 349-355.
- [15] LIN J, LIAN R J. Enhanced fuzzy sliding mode controller for active suspension systems [J]. Mechatronics, 2009, 19(7): 1178-1190.
- [16] LIN T C. Based on interval type-2 fuzzy-neural network direct adaptive sliding mode control for SISO nonlinear systems [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2010, 15(12): 4084-4099.
- [17] NOROOZI N, ROOPAELI M. Adaptive fuzzy sliding mode control scheme for uncertain systems [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2009, 14(11): 3978-3992.
- [18] ANTONELLIG, CHIAVERINIS. A fuzzy logic based approach for mobile robot path tracking [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2007, 15(2): 211-221.

作者简介



葛媛媛,2008年于第二炮兵工程大学获得学士学位,2011年于河北工业大学获得硕士学位,现为榆林学院讲师,主要研究方向为控制科学与技术。

E-mail:Ge_yuanyuan022@123.com

Ge Yuanyuan received B. Sc. from Second Artillery Engineering University in 2008 and M. Sc. from Hebei University of Technology in 2011, respectively. Now she is a lecturer in Yulin University. Her main research interest includes control science and technology.



张宏基,2008年于西安理工大学获得学士学位,2011年西安理工大学获得硕士学位,2017年于西北工业大学获得博士学位,现为榆林学院讲师,主要研究方向为先进复合材料自动化成型工艺技术;先进制造技术及其装备。

E-mail:sanxing258@123.com

Zhang Honji received B. Sc. from Xi'an University of Technology in 2008, M. Sc. from Xi'an University of Technology in 2011, and Ph. D. from Northwestern Polytechnical University in 2017, respectively. Now he is a lecturer in Yulin University. His main research interest includes automatic forming technology of advanced composite materials, advance manufacturing technology and equipment.

是德科技新款 MIPI[®] D-PHYSM 和 C-PHYSM 测试解决方案 加速移动技术和物联网技术开发

移动芯片组制造商现在能够验证 D-PHY v2.0/v2.1 和 C-PHY v1.0/v1.1 一致性,并优化支持新标准的设计

是德科技公司(NYSE:KEYS)近日宣布推出新的 MIPI D-PHY 和 C-PHY 测试解决方案,帮助加速下一代移动和物联网设备的开发。是德科技新款测试解决方案支持 MIPI 联盟的 D-PHY v2.0/v2.1 规范和 C-PHY v1.0/v1.1 规范及一致性测试套件。该测试解决方案包括用于 Infiniium 示波器的 Keysight U7238E MIPI D-PHY 一致性测试软件和 U7250A MIPI C-PHY 一致性测试软件,用于发射机测试的 Keysight DSAV164A 数字示波器,以及在 M8195A 或 M8190A 任意波形发生器上运行的 Keysight M8085A MIPI 接收机测试解决方案软件包。

MIPI 联盟新的 MIPI D-PHY 和 C-PHY 规范能够满足瞬息万变的各种市场需求。在虚拟现实(VR)和增强现实(AR)市场中,每个规范支持高达 9 Gbps 和 11.4 Gbps(5 Gbps)的摄像头接口速率,同时支持 8K 60 Hz 的视频录制。在自动驾驶汽车市场中,汽车要求配备多个摄像头模块和传感器,以便代替人眼侦测环境条件,新规范因为能够满足低时延和支持虚拟通道等要求,并且不会增加电缆线束的重量,所以尤为重要。

要想支持这些不同的市场需求,必须进行更高数据速率和更复杂的验证测试。与之前的规范相比,这给测试和验证工程师带来了更严峻的挑战。

MIPI 联盟理事会主席 Joel Huloux 表示:“提供支持 MIPI 接口标准的理想测试解决方案,这是营造生态系统必不可少的基石。我们很高兴看到,是德科技证明了他们对 MIPI 标准持续不断的支持,其新款解决方案可以满足现在和未来的测试要求。”对于未来的测试需求,是德科技解决方案还能在单个 M8195A AWG 模块中提供 8

Gbps D-PHY 信号,并能同步两个或多个 M8195A 模块来生成 16 Gbps D-PHY 信号。对于 C-PHY,测试解决方案能够生成高达 8 Gbps 的 C-PHY 信号。

在物联网环境设备中,高效率电池是极其重要的部件,这种电池需要续航时间较长且充电次数较少。MIPI 联盟近日发布了管理电池接口的新接口—系统电源管理接口(SPMI)。Keysight N8845A 应用软件能够在 Infiniium 系列示波器上对 SPMI 数据进行解码。这款应用软件提供了根据特定数据包进行准确恰当的触发的功能和详细的解码信息,帮助设计人员节省大量开发时间。

是德科技副总裁兼无线设备部门总经理 Kailash Narayanan 表示:“是德科技的 MIPI 测试解决方案能够帮助移动行业进行技术创新,并确保您与不断演进的标准保持一致,同时满足持续增长的数据速率要求。通过与 MIPI 联盟和行业领袖合作,我们能够提供完整的解决方案,全面覆盖新的 MIPI D-PHY v2.0 和 v2.1 规范、C-PHY v1.1 规范及 CTS 测试。”

关于德科技

是德科技公司(NYSE:KEYS)帮助客户将具有突破性的电子产品和系统以更低的成本更快推向市场。从设计到仿真,再到原型设计验证、生产测试以及网络中的优化,是德科技提供全方位的电子信号测试与分析解决方案。我们的客户遍及全球通信、互联网基础设施、航空航天与国防、汽车、半导体和通用电子终端市场。2016 财年,是德科技收入达 29 亿美元。更多信息,请访问 www.keysight.com。