

基于输入模糊化的农用履带机器人自适应滑模控制*

焦俊¹ 孔文¹ 王强¹ 陈黎卿² 辜丽川¹ 高雅¹

(1. 安徽农业大学信息与计算机学院, 合肥 230036; 2. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036)

摘要: 针对农用履带机器人控制系统易受到参数摄动和外部扰动影响的特点, 将模糊理论与滑模控制结合起来, 提出了基于模糊逻辑的自适应滑模控制, 以提高控制精度与稳定性。首先, 推演了履带机器人运动学模型, 分析了模型的特点。其次, 设计了一种含有积分项的滑模面, 构建了基于等效控制和切换控制的模糊滑模自适应控制, 既保留了滑模控制的快速性和鲁棒性, 又很好地抑制了抖振。仿真与实验结果表明, 与常规的滑模控制方法相比, 该控制不仅对外部扰动及参数摄动具有较强的自适应性和鲁棒性, 而且具有动态响应快、跟踪性能好的特点, 适用于履带机器人控制系统。

关键词: 农用履带机器人 模糊滑模控制 滑动模态

中图分类号: TP242.2; TP273.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)06-0014-06

Self-adaptive Sliding Mode Control Based on Input Fuzzy for Agricultural Tracked Robot

Jiao Jun¹ Kong Wen¹ Wang Qiang¹ Chen Liqing² Gu Lichuan¹ Gao Ya¹

(1. School of Information and Computer, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of parameter perturbations and the effect of disturbance outside in agricultural tracked robot control system, a self-adaptive fuzzy sliding mode control was proposed based on fuzzy logic theory to improve the control precision and stability, which combined sliding mode control with fuzzy theory. Firstly, the motion equation of agricultural tracked robot was derived and analyzed. Secondly, an integral sliding mode surface was proposed, and an adaptive fuzzy sliding mode control was designed based on equivalent efficiency control and switching control, which held the celerity and robustness of sliding mode control and also weakened the buffeting very well. The simulation and test results showed that compared with conventional sliding mode control method, the proposed control possessed the advantages of good adaptability and robustness to outside disturbances and parameter uncertainty, and also had fast dynamic response and well tracking performance, which was feasible for agricultural tracked robot controlling system.

Key words: Agricultural tracked robot Fuzzy sliding mode control Sliding mode

引言

农用履带机器人 (Agricultural tracked robot,

ATR) 在非结构化农田环境中运行时, 由于机身弹性变形、参数变化和外界扰动, 使所建立的运动模型存在高度的非线性、强耦合和不确定性, 影响了控制器

收稿日期: 2015-01-27 修回日期: 2015-04-06

* 国家自然科学基金资助项目(51305004, 31371533)、安徽省教育厅自然科学基金资助项目(KJ2014A074)、安徽省教育厅质量工程资助项目(2014jyxm091, 2014tszy090)和安徽农业大学博士启动基金资助项目

作者简介: 焦俊, 副教授, 博士, 主要从事农业机器人和物联网研究, E-mail: jiaojun2000@sina.com

通讯作者: 辜丽川, 教授, 博士, 主要从事农业机器人和物联网研究, E-mail: gulichuan@ahau.edu.cn

的控制品质^[1-2]。因此在控制系统存在不确定性及未知干扰条件下,保证控制系统实现稳定跟踪控制,在履带机器人的实际应用中显得尤为重要。

在现有的文献中针对履带式机器人运动控制的方法比较少,履带机器人和轮式移动机器人在运动学模型方面有诸多的相似之处^[3],但直接借鉴轮式机器人的控制难以满足履带机器人精确控制的要求。

滑模控制(Sliding mode control, SMC)是一种控制方法,与常规控制的根本区别在于控制的不连续性,即一种使系统“结构”随时变化的开关特性^[4-5]。本文提出的履带机器人模糊滑模控制(Fuzzy sliding mode control, FSMC),是把模糊理论与滑模控制结合起来,构建由等效控制和切换控制组成的总控制,设计了逼近等效控制的逼近控制和可以调整控制参数的自适应律,实时调节输出控制,有目的地使控制对象沿着设计好的“滑动模态”轨迹运动。

1 农用履带机器人的运动学模型

农用履带机器人的路径跟踪示意图如图1所示。移动平台由底盘(车体、2个驱动轮、4个负重轮、2个诱导轮)和2条履带组成,2个直流伺服电动机分别驱动2条履带^[6],通过调节伺服电动机的输入电压调整机器人速度与跟踪轨迹的位置关系。

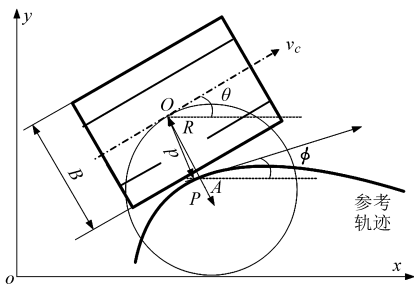


图1 农用履带机器人路径跟踪示意图

Fig. 1 ATR trajectory tracking scheme

在图1中, B 为两驱动轮间距, θ 为机器人运动方向与 x 轴正向的夹角,点 P 为机器人中心 O 与转弯圆弧的圆心 A 的连线与参考轨迹的交点, d 为机器人几何中心 O 距离 P 点的距离, ϕ 为道路切点 P 处的切线与 x 轴正向的夹角。

若驱动轮与履带之间无滑动,机器人的质心与几何中心重合,则在 t 时刻机器人的几何中心 O 绕瞬心 A 的转弯半径 R 为

$$R = \frac{B(v_l + v_r)}{2(v_l - v_r)} \quad (1)$$

式中 v_l, v_r ——左、右轮相对于地面的线速度

在时刻 t 机器人绕瞬心 A 转动时两驱动轮中点

速度为

$$v_c = \frac{v_l + v_r}{2} \quad (2)$$

当短时间间隔 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,由图1的几何关系可知,机器人方向角 θ 和中心位置 d 的微分形式为

$$\dot{\theta} = \frac{v_r - v_l}{R} = \frac{2}{R} \Delta v \quad (3)$$

$$\dot{d} = \frac{v_l + v_r}{2} \sin \theta = v_c \sin \theta \quad (4)$$

由直流伺服电动机的特性^[7]可知

$$v_r(s) = \frac{k_n}{1 + T_m s} U_r(s) \quad (5)$$

$$v_l(s) = \frac{k_n}{1 + T_m s} U_l(s) \quad (6)$$

式中 T_m ——时间常数

k_n ——机器人传动系统驱动增益

$v_l(s)$ —— v_l 的Laplace变换

$v_r(s)$ —— v_r 的Laplace变换

$U_l(s)$ ——左轮伺服电动机电枢电压的Laplace变换

$U_r(s)$ ——右轮伺服电动机电枢电压的Laplace变换

将式(5)减去式(6)可得

$$\Delta v(s) = \frac{k_n}{1 + T_m s} \Delta U(s) \quad (7)$$

将式(7)进行Laplace反变换,可得

$$\Delta \dot{v}(t) = -\frac{1}{T_m} \Delta v(t) + \frac{k_n}{T_m} \Delta U(t) \quad (8)$$

由于材料损耗、电动机间隙和温度因素等引起电动机参数 k_n 和 T_m 分别变化 Δk_n 和 ΔT_m ,加上外部干扰信号 D 的影响^[8],式(8)转换为

$$\Delta \dot{v} = -\frac{1}{T_m + \Delta T_m} \Delta v + \frac{k_n + \Delta k_n}{T_m + \Delta T_m} u + D \quad (9)$$

对式(9)进行Taylor展开,转换为

$$\Delta \dot{v} = -\frac{1}{T_m} \Delta v + \frac{\Delta T_m}{T_m^2} \Delta v + \frac{k_n}{T_m} u + \left(\frac{\Delta k_n}{T_m + \Delta T_m} - \frac{\Delta T_m k_n}{T_m^2} \right) u + D \quad (10)$$

令 $n = \frac{\Delta T_m}{T_m^2} \Delta v + \left(\frac{\Delta k_n}{T_m + \Delta T_m} - \frac{\Delta T_m k_n}{T_m^2} \right) u + D$,为系统参数扰动及外部干扰产生的不确定项。对式(3)求导可得

$$\ddot{\theta} = \frac{2}{R} \Delta \dot{v} \quad (11)$$

将式(10)代入式(11),转换为

$$\ddot{\theta} = -\frac{\dot{\theta}}{T_m} + \frac{2k_n}{RT_m} u + \frac{2n}{R} \quad (12)$$

2 自适应模糊滑模控制设计

2.1 二维模糊逻辑

二维模糊逻辑系统是一种从输入论域 $U = [\alpha_1, \beta_2] \times [\alpha_1, \beta_2] \subset \mathbf{R}^2$ 到输出论域 $V \subset \mathbf{R}$ 的非线性映射,在 $[\alpha_i, \beta_i]$ ($i=1,2$) 上分别定义 N_i 个标准、一致和完备的模糊集^[9-11]。模糊系统的核心由一系列 IF-THEN 规则组成,其中第 j 条 IF-THEN 规则为

$$R^j: \text{IF } x_1 \text{ is } F_1^j \text{ and } x_2 \text{ is } F_2^j \text{ THEN } y \text{ is } G^j \quad (j=1,2,\dots,l)$$

其中 $[x_1 \ x_2]^T \in U$ 和 $y \in \mathbf{R}$ 分别是模糊逻辑系统的输入和输出。 F_1^j, F_2^j 和 G^j 是模糊集合, l 是模糊规则的数量。模糊规则描述了输入与输出之间的关系。

若模糊逻辑系统采用单值模糊化、乘积推理机和中心平均解模糊化,则模糊逻辑系统的输出可以表示为^[12-15]

$$y(x) = \frac{\sum_{j=1}^l \psi_j \prod_{i=1}^2 \mu_{F_i^j}(x_i)}{\sum_{j=1}^l \prod_{i=1}^2 \mu_{F_i^j}(x_i)} \quad (13)$$

$$\text{其中 } \psi_j = \arg \max_{y \in \mathbf{R}} \mu_{G^j}(y) \quad (14)$$

式中 $\mu_{F_i^j}(x_i)$ ——模糊集合 F_i^j 的隶属度函数,描述了输入变量隶属于模糊集合 F_i^j 的程度

ψ_j ——使 $\mu_{G^j}(y)$ 达到最大值的中心

通过模糊基函数,模糊逻辑系统的输出可以表示为^[16]

$$y(x) = \psi^T \xi(x) \quad (15)$$

$$\text{其中 } \xi(x) = \frac{\prod_{i=1}^2 \mu_{F_i^j}(x_i)}{\sum_{j=1}^l \prod_{i=1}^2 \mu_{F_i^j}(x_i)} \quad (16)$$

式中 ψ ——可调参数向量

$\xi(x)$ ——模糊基函数向量

模糊基函数蕴含着模糊规则库中每一个规则对最终模糊决策的影响程度,是每一个规则在模糊决策中的权重。

2.2 模糊滑模控制

针对式(12)的非线性系统,令 $m = 2n/R, f(\theta, t) = -\dot{\theta}/T_m, g = 2k_n/(RT_m)$, 则式(12)转换为

$$\ddot{\theta} = f(\theta, t) + gu(t) + m \quad (17)$$

滑模控制器输出的期望角为 $\theta_d(t)$, 参考路径切点 P 处的切向角为 $\theta(t)$ 。滑模控制输出的方向角跟踪轨迹的切向角,同时使中心位置偏差 d 趋近

0,实现移动履带机器人光滑地跟踪给定轨迹,角度跟踪误差为 $e(t) = \theta(t) - \theta_d(t)$ 。

为了增强控制系统的动态性能与鲁棒性,定义一个时变和含有积分项的滑模面

$$s(t) = \dot{\theta}(t) - \int_0^t (\ddot{\theta}_d - k_1 \dot{e}(t) - k_2 e(t)) dt \quad (18)$$

式中 k_1, k_2 ——非零正常数

在 $s(t) \rightarrow 0$ 定义一个滑模面,在这个滑模面上跟踪误差 $e(t)$,使之趋近于零^[17-19]。

对式(18)求导,转换为

$$\dot{s}(t) = \ddot{\theta}(t) - \ddot{\theta}_d + k_1 \dot{e}(t) + k_2 e(t) \quad (19)$$

将式(17)代入式(19),在 $m \rightarrow 0$ 的条件下,得到滑模状态下的等效控制

$$u^*(t) = g^{-1}(-\eta s_\Delta(t) - f(\theta, t) + \ddot{\theta}_d(t) - k_1 \dot{e}(t) - k_2 e(t)) \quad (20)$$

$$\text{其中 } s_\Delta(t) = s(t) - \phi \text{sat}(s(t)/\phi) \\ \begin{cases} |s_\Delta(t)| = |s(t)| - \phi & (|s(t)| > \phi) \\ s_\Delta(t) = \dot{s}_\Delta(t) = 0 & (|s(t)| \leq \phi) \end{cases}$$

式中 η ——正常数

$s_\Delta(t)$ ——状态与边界层的代数距离

ϕ ——边界层的厚度

将式(20)代入式(17),再将结果代入式(19),得

$$\dot{s}(t) + \eta s_\Delta(t) = 0 \quad (21)$$

若 $|s| > \phi$, 则可知当 $t \rightarrow \infty$ 时,有 $s_\Delta(t) \rightarrow 0$, 即 $|s| \rightarrow \phi$, 进而可知在 $e(t) \rightarrow 0$ 的邻域内,邻域的大小与 ϕ 的取值有关。

由于元件惯性、电动机间隙、材料损耗以及时延等非理想因素的影响,导致式(20)中 $f(\theta, t)$ 和 g 发生变化,再加上外部干扰的影响,根据式(20)计算出的控制量难以实现精确的跟踪控制。所以采用自适应模糊控制来逼近等效控制 $u^*(t)$ 。选择 $s(t)$ 和 $\dot{s}(t)$ 作为模糊系统的输入,根据模糊系统输出的简化式(15),设计模糊逼近控制 $u_e = \psi^T \xi$ 逼近 $u^*(t)$, 同时利用自适应律式(22)在线调整参数 ψ ^[20]。

$$\dot{\psi} = r s_\Delta(t) \xi(x) \quad (22)$$

式中 r ——正常数

采用切换控制 u_{sw} 补偿 u_e 与 $u^*(t)$ 之间的差值,即

$$u_{sw} = -E(t) \text{sgn}(s_\Delta(t)) \quad (23)$$

定义 $E(t)$ 的自适应律为

$$\dot{E}(t) = \eta_2 |s_\Delta(t)| \quad (24)$$

式中 η_2 ——正常数

则模糊滑模的总控制律为

$$u = u_e + u_{sw} \quad (25)$$

3 仿真

对所提出的模糊滑模控制进行基于 Matlab 仿真研究,搭建仿真模型。

选择阶跃和正弦信号作为参考信号,参数设置:电动机时间常数 $T_m = 0.21$ s,电动机及传动驱动增益 $k_n = 0.4$ V/s;轮半径 $r = 0.12$ m,两驱动轮间距 $B = 0.6$ m;滑模控制的初值 $k_1 = 5, k_2 = 12, \eta = 0.3$;模糊滑模控制的初值 $r = 100, \eta_2 = 0.45, \phi = 0.2$, ψ 和 E 中各个元素的初始值设为 0.1。ATR 运行速度 $v = 3$ m/s。仿真采样时间为 0.01 s。

模糊控制器的输入 x_1 为 s, x_2 为 \dot{s} , 输出为 y, x_1 和 x_2 的论域分别为 $[-1, 1]$ 。 x_1 和 x_2 状态变量有 7 种不同的模糊语言描述,其对应的模糊隶属函数定义为

$$\mu F_i^1(x_i) = \exp(-((x_i + 0.897)/0.15)^2)$$

$$\mu F_i^2(x_i) = \exp(-((x_i + 0.598)/0.15)^2)$$

$$\mu F_i^3(x_i) = \exp(-((x_i + 0.3)/0.15)^2)$$

$$\mu F_i^4(x_i) = \exp(-(x_i/0.15)^2)$$

$$\mu F_i^5(x_i) = \exp(-((x_i - 0.3)/0.15)^2)$$

$$\mu F_i^6(x_i) = \exp(-((x_i - 0.598)/0.15)^2)$$

$$\mu F_i^7(x_i) = \exp(-((x_i - 0.897)/0.15)^2)$$

式中 $i = 1, 2$ 。

3.1 阶跃信号响应特性仿真

控制系统输入单位阶跃信号,阶跃响应终止时间为 2 s,终止值是 1 rad,图 2 和图 3 为阶跃响应特性曲线。

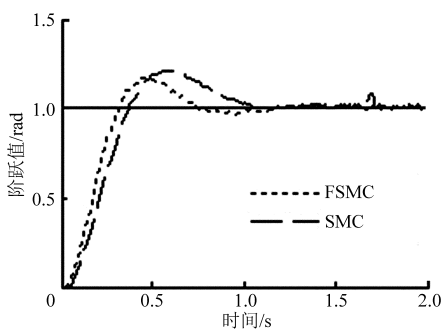


图2 阶跃响应曲线

Fig.2 Step response curve

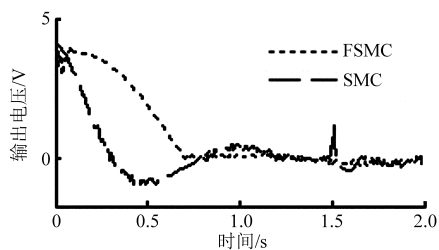


图3 FSMC 和 SMC 控制曲线

Fig.3 Comparison of control curves of FSMC and SMC

图 2 为单位阶跃响应曲线,从图 2 可知,SMC 的单位阶跃响应上升时间 $t_s = 0.4$ s,峰值时间 $t_p = 0.62$ s,超调量 $\sigma_p = 0.24$,调节时间 $t_s = 1.25$ s;FSMC 的单位阶跃响应上升时间 $t_s = 0.3$ s,峰值时间 $t_p = 0.48$ s,超调量 $\sigma_p = 17.8\%$,调节 $t_s = 0.8$ s 后,达到稳定状态,FSMC 在 0.8 s 后输出的控制量稳定且光滑,没有抖振;SMC 输出的控制曲线在 1.2 s 后趋于稳定,但有抖振现象。

图 3 为单位阶跃控制输出曲线,SMC 的控制曲线在 1.15 s 后才达到稳定,有抖振现象;与 SMC 控制输入曲线相比,FSMC 的控制量抖振现象不明显,0.8 s 后输出控制基本稳定,消除抖振现象。

在 $t = 1.56$ s 时,输入叠加幅值为 0.4 V 的脉冲扰动, k_n 增加 15% 的扰动,从图 2 可以看出,SMC 控制响应速度较慢,有超调现象,需要一段时间才能稳定到原来的平衡状态,而 FSMC 控制的响应曲线保持稳定,几乎没有变化,从图 3 可见,与 SMC 控制相比,FSMC 控制对突加参数扰动和外部的干扰快速地做出响应,调节系统至稳定状态,具有更好的抗干扰能力。

3.2 正弦信号响应特性

以正弦信号 $r(t) = \sin t$ 为仿真输入参考转角,仿真时间为 10 s,仿真采样时间为 0.01 s。假设 ATR 的初始状态与参考路径的初始偏差为 $[\theta, d] = [\pi/6, 0]$,仿真结果如图 4~7 所示。

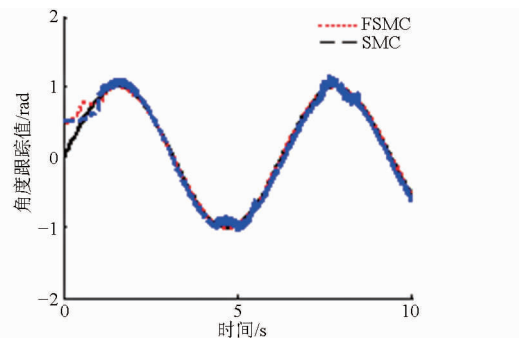


图4 角度跟踪轨迹

Fig.4 Angle tracking trajectory

图 4 为角度跟踪曲线,从图中可见,SMC 和 FSMC 都能跟踪参考曲线,在启动阶段都有较大的跟踪误差,这是由于机器人的初始状态与参考轨迹之间有较大初始偏差造成的。

从图 5 可得,FSMC 控制产生的误差在 0.8 s 后趋近于 0,稳态误差稳定在 $-0.015 \sim 0.012$ rad 附近,而 SMC 的跟踪误差较大,有抖振现象,特别是在 1~2 s、4.8~5.2 s 和 7.0~8.2 s 期间,当 k_n 增加了 15% 的参数扰动和幅度为 0.05 的随机干扰时,误差更大。

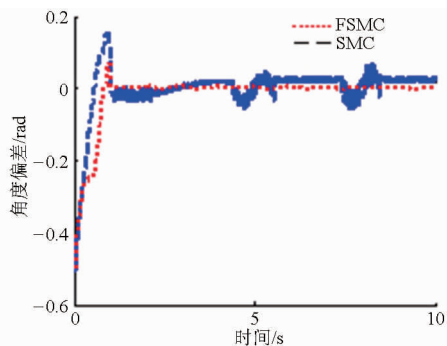


图5 角度跟踪偏差

Fig. 5 Angle tracking deviation

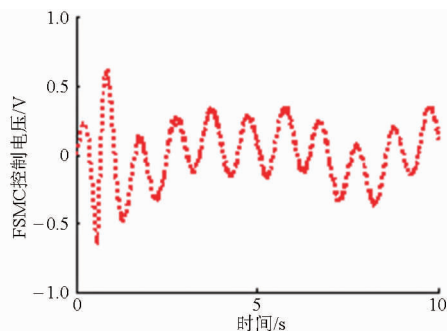


图6 FSMC控制曲线

Fig. 6 Dynamic control curve of FSMC

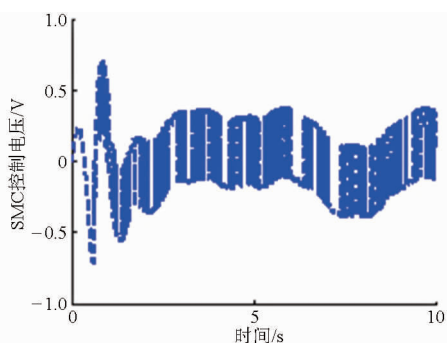


图7 SMC控制曲线

Fig. 7 Dynamic control curve of SMC

从图6可见,FSMC的输出控制较为平滑,这是因为FSMC能够根据角度偏差,结合模糊理论实时地计算出输出控制量,从而保证轨迹跟踪的精密性。

而图7显示SMC的控制量有较大的抖振,这是由于SMC的输出控制量是由式(19)计算出来,对参数的扰动和外部干扰的抵抗力较弱所造成的。

4 实验

实验是在自主研发的农用履带机器人上进行。采用自主研发的基于S3C2440的开发板和WINCE6.0操作系统为控制器。实验条件为干硬土壤和草混杂的路面,实验现场如图8所示。采用惯导SPAN-CPT作为状态信息的接收设备,安装在履带机器人的参考点O,信息更新率为10 Hz,位置测量精度为0.01 m,速度精度为0.01 m/s,角度精度

为0.02 rad;机器人跟踪的路径是 $y = 5\sin x$,运行路径长为110 m,机器人运行速度为3 m/s。履带机器人物理参数及其他参数的设定同第3节。

参考轨迹的初始条件为

$$[x(0) \quad y(0) \quad \theta(0)]^T = [0 \quad 0 \quad \pi/3]^T$$

履带机器人的初始位姿为

$$[x(0) \quad y(0) \quad \theta(0)]^T = [0 \quad 2.5 \quad \pi/4]^T$$

初始位姿误差为

$$[e_1(0) \quad e_2(0) \quad e_3(0)]^T = [0 \quad -2.5 \quad \pi/12]^T$$



图8 实验中的农用机器人

Fig. 8 ATR used in actual experiment

图9描述了农用履带机器人在采用FSMC和SMC控制方法时的轨迹跟踪结果,FSMC控制产生的轨迹比SMC控制产生的轨迹更加平滑。图10是这2种控制方法控制下所产生的距离偏差。

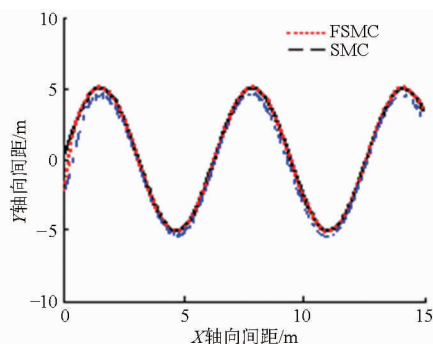


图9 路径跟踪

Fig. 9 Trajectory comparison

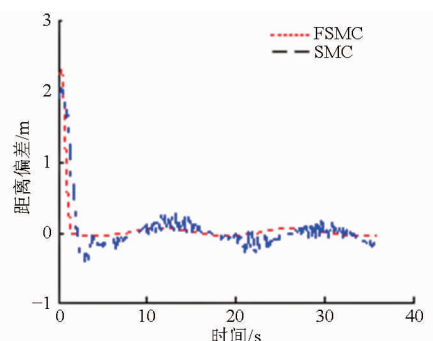


图10 路径跟踪偏差曲线

Fig. 10 Tracking error curve of path

从图9和图10中可以发现,在机器人的启动阶段,由于启动位置偏差,使得这2种控制方法都产生

了较大的距离偏差,机器人运行在正弦曲线的非顶点处时,FSMC控制的跟踪轨迹更加平滑,与参考曲线之间的偏差接近零,而SMC控制产生的偏差较大,特别是在正弦路径顶点附近,路径曲率变化较大,机械转向幅度较大的情况下,履带机器人的侧滑和离心力影响较为严重,产生严重的参数摄动和外界干扰时,偏差更大。

从图10中可以发现,FSMC产生的距离偏差在 $\pm 0.1\text{ m}$ 的小幅变化范围内变化,反映FSMC具有较强的抗参数的摄动和外部扰动的能力,而SMC变化是在 $\pm 0.3\text{ m}$ 的范围内变化。

由图11可以发现系统刚启动时,这2个控制器输出的控制量相当,但是随着系统跟踪误差减小以及系统逐渐进入稳态后,FSMC控制曲线光滑连续,这是由于FSMC运用了模糊逼近理论,将反应角度跟踪误差跟踪状况的滑模 s 和 \dot{s} 作为模糊控制的输入,以可控制参数向量与模糊基函数向量积作为模糊控制输出,结合切换控制,柔化了控制量,提高了控制精度。而SMC是根据式(20)计算控制量,抵抗参数摄动和外部扰动的能力较弱,所以输出的控制有较大的波动。

可见,FSMC能够准确地计算出履带机器人运行过程中的控制量,反映该控制方法的有效性。

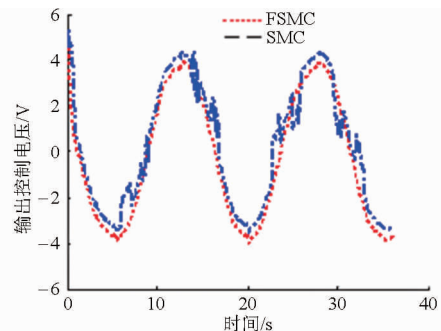


图11 FSMC和SMC控制曲线

Fig. 11 Comparison of control curves of FSMC and SMC

5 结束语

将模糊控制、滑模控制和自适应控制结合起来,提出了一种基于输入模糊化的模糊滑模控制,设计了模糊等效控制和切换控制,在线调整 $E(t)$ 和 $\theta(t)$,提高了控制精度。文中所给出的仿真和试验结果表明,采用FSMC控制时,系统的稳定性、快速性及抗扰能力均明显优于SMC控制,具有较高的工程应用价值。

参 考 文 献

- Jiao J, Chen W W, Leung K S, et al. Intelligent variable structure control for automated guided vehicle [C] // IEEE World Congress on Evolutionary Computation, 2008. CEC 2008, 2008: 3968 - 3973.
- Jiao Jun, Zhang Youhua, Sun Li, et al. A sliding parameter estimation method based on UKF for agricultural tracked robot [C] // Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on System and Informatics, ICSAI 2004, 2004: 270 - 275.
- Sun M X, Xie H Y, Wang H. Switching-function dynamics designs for uncertain variable structure systems with repetitive control [J]. International Journal of Control, 2011, 84(7): 1196 - 1208.
- 刘学军, 何仁. 电磁-压复合防抱死制动系统滑模控制[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 1 - 7.
Liu Xuejun, He Ren. Sliding mode control in electromagnetic-hydraulic hybrid anti-lock braking system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 1 - 7. (in Chinese)
- 杨柳青, 陈无畏, 高振刚, 等. 基于电磁阀减振器的1/4车辆半主动悬架非线性控制[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 1 - 7.
Yang Liuqing, Chen Wuwei, Gao Zhen'gang, et al. Nonlinear control of quarter vehicle model with semi-active suspension based on solenoid valve damper [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 1 - 7. (in Chinese)
- 焦俊, 汪宏喜, 陈祎琼, 等. 基于UKF的农用履带机器人滑动参数估计[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 55 - 60.
Jiao Jun, Wang Hongxi, Chen Yiqiong, et al. Estimating sliding parameters of agricultural tracked robot based on UKF [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 55 - 60. (in Chinese)
- 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- 崔明月, 孙棣华, 李永福, 等. 轮子纵向打滑条件下的移动机器人自适应跟踪控制[J]. 控制与决策, 2013, 28(5): 664 - 670.
Cui Mingyue, Sun Dihua, Li Yongfu, et al. Adaptive tracking control of wheeled mobile robots in presence of longitudinal slipping [J]. Control and Decision, 2013, 28(5): 664 - 670. (in Chinese)
- Wu Yihu, Song Dandan, Hou Zhixiang, et al. A fuzzy control method to improve vehicle yaw stability based on integrated yaw moment control and active front steering [C] // Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2007: 1508 - 1512.
- 沈艳霞, 纪志成. 基于无源性永磁同步电机模糊滑模控制系统研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(17): 4012 - 4016.
Shen Yanxia, Ji Zhicheng. Passivity-based fuzzy sliding-mode control system and experiment research for permanent magnet synchronous motors [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(17): 4012 - 4016. (in Chinese)
- 梁捷, 陈力. 空间机械臂关节运动的自适应模糊补偿控制[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(3): 577 - 582.
Liang Jie, Chen Li. Fuzzy logic adaptive compensation control for space manipulator to track desired trajectory in joint space [J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(3): 577 - 582. (in Chinese)

参 考 文 献

- 1 Yuko Ueka, Jun Yamashita, Kazunobu Sato, et al. Study on the development of the electric tractor: specifications and traveling and tilling performance of a prototype electric tractor[J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2013, 6(4): 160 – 164.
- 2 高辉松,朱思洪. 电动拖拉机传动系设计理论与方法研究[J]. *南京农业大学学报*, 2009, 32(1): 140 – 145.
Gao Huisong, Zhu Sihong. Study on design theory and method for driving line of electric tractor [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2009, 32(1): 140 – 145. (in Chinese)
- 3 高辉松,朱思洪,吕宝占. 电动拖拉机发展及其关键技术[J]. *拖拉机与农用运输车*, 2007, 34(6): 4 – 7.
Gao Huisong, Zhu Sihong, Lü Baozhan. Development of electric tractor and key techniques[J]. *Tractor and Farm Transporter*, 2007, 34(6): 4 – 7. (in Chinese)
- 4 高辉松. 电动拖拉机驱动系统研究[D]. 南京:南京农业大学, 2008.
- 5 王元杰,刘永成,杨福增,等. 温室微型遥控电动拖拉机的研制与试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 23 – 28.
Wang Yuanjie, Liu Yongcheng, Yang Fuzeng, et al. Development and test of tiny remotely controlled electric tractor for greenhouses[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(22): 23 – 28. (in Chinese)
- 6 Ricardo Pinto de Castro, Hugo Santos Oliveira, José Ricardo Soares, et al. A new FPGA based control system for electrical propulsion with electronic differential[J]. *Power Electronics and Applications*, 2007, 5(2): 1 – 10.
- 7 Jung-Woo Park, Dae-Hyun Koo, Jong-Moo Kim, et al. High performance drive unit for 2-motor driven electric vehicle [C] // *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 1999. APEC '99. Fourteenth Annual, 1999, 1: 443 – 449.
- 8 机械电子工业部洛阳拖拉机研究所. 拖拉机设计手册:上册[M]. 北京:机械工业出版社, 1994: 196 – 197.
- 9 秦和. 电动机效率测定方法的进展[J]. *中小型电机*, 2004, 31(1): 65 – 73.
Qin He. Development of measurement on motors efficiency[J]. *S&M Electric Machines*, 2004, 31(1): 65 – 73. (in Chinese)
- 10 镇江农业学院, 洛阳农机学院. 拖拉机理论[M]. 北京:中国农业机械出版社, 1981: 60 – 62.
- 11 周一鸣. 汽车拖拉机学:汽车拖拉机理论[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2000: 126 – 145.
- 12 张宁. 关于犁耕阻力研究之浅析[J]. *粮油加工与食品机械*, 1989(5): 15 – 17.
- 13 王博, 李山. 电动汽车驱动电机实验平台电池模拟系统设计[D]. 重庆:重庆理工大学, 2013.
- 14 孙善辉, 夏超英. 电动汽车电机及驱动系统实验平台的设计与开发[J]. *电气传动*, 2006, 36(2): 40 – 44.
Sun Shanhui. Xia Chaoying. Design and development of a test platform for the motor and drive system of the electric vehicle[J]. *Electric Drive*, 2006, 36(2): 40 – 44. (in Chinese)
- 15 陈国迎. 四轮独立线控电动汽车实验平台搭建与集成控制策略研究[D]. 长春:吉林大学, 2012.
- 16 李星晔. 电动汽车电机控制系统仿真实验平台的设计与实现[D]. 成都:电子科技大学, 2013.
- 17 汪漫, 孙德超, 屈年全. 轮式拖拉机牵引性能的影响因素及改善方法[J]. *农机化研究*, 2004, 5(3): 258 – 259.
Wang Man, Sun Dechao, Qu Nianquan. Factors of wheeled tractor pulling and ways to improve performance[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2004, 5(3): 258 – 259. (in Chinese)
- 18 GB/T 18385—2001 电动汽车 动力性能 实验方法[S]. 2001.
- 19 戴军康. 汽车主减速器总成综合性能试验台的研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2008.
- 20 卢毅. 温室电动拖拉机主要部件的研究与设计[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.

(上接第 19 页)

- 12 张金萍, 刘阔, 林剑峰, 等. 挖掘机的 4 自由度自适应模糊滑模控制[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(21): 87 – 92.
Zhang Jinping, Liu Kuo, Lin Jianfeng, et al. 4-DOF adaptive fuzzy sliding mode control of excavator[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(21): 87 – 92. (in Chinese)
- 13 Hsu Yachen, Chen Liang, Li Hanxiong. A fuzzy adaptive variable structure controller with applications to robot manipulators[J]. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2001, 31(3): 331 – 340.
- 14 Labiod Salim, Boucherit Mohamed Seghir, Guerra Thierry Marie. Adaptive fuzzy control of a class of MIMO nonlinear systems [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2005, 151(1): 59 – 77.
- 15 Byung Kook Yoo, Woon Chul Ham. Adaptive control of robot manipulator using fuzzy compensator[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2000, 8(2): 186 – 199.
- 16 Purwar S, Kara I N, Jha A N. Adaptive control of robot manipulators using fuzzy logic systems under actuator constraints[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2005, 152(3): 651 – 664.
- 17 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 2012.
- 18 Ouyang P R, Zhang W J, Madan M Gupta. An adaptive switching learning control method for trajectory tracking of robot manipulators[J]. *Mechatronics*, 2006, 16(1): 51 – 61.
- 19 李鹏, 郑志强. 非线性积分滑模控制方法[J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(3): 422 – 426.
Li Peng, Zheng Zhiqiang. Sliding mode control approach with nonlinear integrator[J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(3): 422 – 426. (in Chinese)
- 20 王立新. 自适应模糊系统与控制-设计与稳定性分析[M]. 北京:国防工业出版社, 1995.