

# 基于补偿控制的无人地面车辆轨迹跟踪方法

张豫南, 王 恒, 闫永宝, 王志辉

(装甲兵工程学院 控制工程系, 北京 100072)

**摘要:** 针对无人地面车辆轨迹跟踪精度不高, 鲁棒性差的问题, 提出了一种基于补偿控制的算法; 该算法分为运动学和动力学两部分: 基于方向角调整策略的运动学控制律能确保无人地面车辆有效跟踪参考轨迹; 基于 PD 与模型参考模糊滑模自适应控制相结合控制的动力学控制律能有效补偿建模不精确和外界扰动带来的影响; 仿真结果表明: 该算法能够有效跟踪参考轨迹, 控制量分配合理且鲁棒性较好。

**关键词:** 无人地面车辆; 轨迹跟踪; 补偿控制; 模糊滑模

## A Trajectory Tracking Method for Unmanned Ground Vehicle Based on Compensation Control

Zhang Yunan, Wang Heng, Yan Yongbao, Wang Zhihui

(Department of Control Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

**Abstract:** Aiming at solving the problem of low accuracy and weak robustness in trajectory tracking, this paper presents a novel trajectory tracking control algorithm for unmanned ground vehicle based on compensation control. This algorithm is comprised of two parts: kinematic control and dynamic control. Based on the concept of orientation adjusting, the kinematic control law makes it possible for the unmanned ground vehicle to track a reference trajectory effectively; the dynamic control law based on a PD-model reference adaptive fuzzy sliding mode control (PD-MRAFSMC) method can compensate the influence brought about by extraneous disturbance and inaccurately modeling. The simulation results show that this novel algorithm can effectively track a given trajectory with reasonable controlled variables and good robustness.

**Keywords:** unmanned ground vehicle; trajectory tracking; compensation control; fuzzy sliding mode

### 0 引言

轨迹跟踪是无人地面车辆 (unmanned ground vehicle, UGV) 的一项关键技术, 是无人地面车辆实现炸药引爆、场地勘探、安全巡逻、战场营救等工程和军事领域应用的前提。

近几十年来, 国内外许多学者针对该技术进行了大量研究。文献 [1] 提出了一种经典的运动学控制方法, 适用于 UGV 轨迹跟踪问题, 为其他学者的后续研究奠定了基础, 但控制精度不高且抗干扰能力较差; 文献 [2-3] 分别提出了基于模糊控制、神经网络控制的动力学控制律, 提高了鲁棒性, 也能有效跟踪参考轨迹, 但控制算法需较强的经验基础和硬件配置, 实现和优化起来较为困难。

本文提出的基于补偿控制的运动学与动力学相结合控制的算法具备以下特点: 运动学控制律能确保无人车跟踪参考轨迹; 动力学控制律采用基于 PD-模型参考模糊滑模自适应控制相结合的方法, 在运动学控制的基础上进一步提高跟踪精度, 增强鲁棒性。

### 1 建模及轨迹跟踪问题描述

本文研究对象为 6 轮 UGV。为便于分析, 假定同侧车轮转速始终保持一致, 车体为刚性框架, 车轮为刚性轮, 重心与几何中心重合, 运动过程中载荷不发生变化。

如图 1 所示, 在全局坐标系  $XOY$  中, UGV 当前位姿坐标为  $(X_c, Y_c, \theta_c)$ , 参考点位姿坐标为  $(X_r, Y_r, \theta_r)$ ; 在局部坐标系  $xoy$  中, 当前和参考点的位姿坐标分别用小写字母表示, 即  $(x_c, y_c, \theta_c)$  和  $(x_r, y_r, \theta_r)$ 。轴距为  $2a$ , 轮距为  $2b$ 。

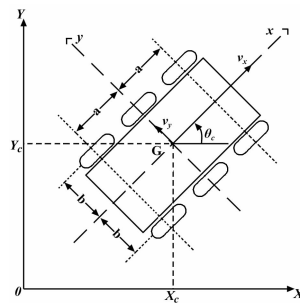


图 1 无人地面车模型

UGV 的运动学和动力学方程为<sup>[4]</sup>:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & x_{ICR} \sin\theta \\ \sin\theta & -x_{ICR} \cos\theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = S \cdot \eta \quad (1)$$

$$\overline{M} \dot{\eta} + \overline{C} \eta + \overline{R} + \overline{\tau}_d = \overline{B} \tau \quad (2)$$

其中:

$$S = \begin{bmatrix} \cos\theta & x_{ICR} \sin\theta \\ \sin\theta & -x_{ICR} \cos\theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \eta = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$$

收稿日期: 2014-06-05; 修回日期: 2014-07-14;

基金项目: 军内科研项目。

作者简介: 张豫南(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事无人地面车辆控制技术方向的研究。



由式 (3)、(4) 中  $\bar{M}$  和  $\bar{C}$  的表达式可知, 假设  $x_{ICR}$  为常数的情况下,  $\bar{M}$  为正定矩阵;  $\dot{x}_{ICR}$  为 0,  $\dot{\theta}$  受制于约束条件也有相应的取值范围; 通过合理选取  $K_d, K_p$  的值, 可使  $\bar{M} + K_d, \bar{C} + K_p$  为正定矩阵; 另外, 选取  $\lambda > 0$ , 则  $V \geq 0$ , 当且仅当  $\eta_e = 0$  时,  $V = 0$ 。

对式 (16) 求导, 得

$$\dot{V} = \lambda \eta_e^T (\bar{M} + K_d) \dot{\eta}_e + \frac{1}{2} \lambda \dot{\eta}_e^T (\bar{C} + K_p) \eta_e \quad (17)$$

将 (15) 代入 (17), 有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \lambda \eta_e^T (P - H \text{sign}(\dot{\eta}_e + \lambda \eta_e)) - \lambda \eta_e^T (\bar{C} + K_p) \dot{\eta}_e + \\ &\dot{\eta}_e^T (P - H \text{sign}((\dot{\eta}_e + \lambda \eta_e)) - \dot{\eta}_e^T (\bar{M} + K_d) \dot{\eta}_e = \\ &(\dot{\eta}_e^T + \lambda \eta_e^T) (P - H \text{sign}((\dot{\eta}_e + \lambda \eta_e)) - \\ &\lambda \dot{\eta}_e^T (\bar{C} + K_p) \eta_e - \dot{\eta}_e^T (\bar{M} + K_d) \dot{\eta}_e \end{aligned} \quad (18)$$

显然, 式 (18) 中  $-\lambda \dot{\eta}_e^T (\bar{C} + K_p) \eta_e, -\dot{\eta}_e^T (\bar{M} + K_d) \dot{\eta}_e$  均为负定, 若令  $H > P_b$ , 则有

$$\begin{aligned} (\dot{\eta}_e^T + \lambda \eta_e^T) H \text{sign}(\dot{\eta}_e + \lambda \eta_e) &= |\dot{\eta}_e^T + \lambda \eta_e^T| H > \\ |\dot{\eta}_e^T + \lambda \eta_e^T| P_b &> (\dot{\eta}_e^T + \lambda \eta_e^T) P \end{aligned}$$

得到  $(\dot{\eta}_e^T + \lambda \eta_e^T) (P - H \text{sign}(\dot{\eta}_e + \lambda \eta_e))$  也为负定, 则  $\dot{V} \leq 0$ 。

根据以上分析, 若合理选取  $K_d, K_p$  和  $H$  的值, 能确保  $V \geq 0, \dot{V} \leq 0$ , 系统具有全局渐进稳定性, 速度误差在有限时间内趋近于 0。

常规滑模控制律中的切换控制部分易导致“抖振”<sup>[7]</sup>。式 (14) 中的  $H \text{sign}(\dot{\eta}_e + \lambda \eta_e)$  也存在同样的问题。当  $\dot{\eta}_e + \lambda \eta_e$  在零点附近摆动时,  $F$  因符号函数  $\text{sign}(\cdot)$  的特性而产生震荡, 从而导致车体抖振。为此, 选用饱和函数  $\text{sat}(\dot{\eta}_e + \lambda \eta_e, \Theta)$  替换符号函数:

$$\text{sat}((\dot{\eta}_e + \lambda \eta_e), \Theta) = \begin{cases} \text{sign}(\dot{\eta}_e + \lambda \eta_e), & |\dot{\eta}_e + \lambda \eta_e| > \Theta \\ (\dot{\eta}_e + \lambda \eta_e) / \Theta, & |\dot{\eta}_e + \lambda \eta_e| \leq \Theta \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $\Theta$  为决定滑模边界层厚度的对角矩阵。

$H$  的取值也会影响控制效果: 过小则补偿作用不足, 过大则易导致“抖振”。由于模糊控制具有稳定性好, 鲁棒性强的特点<sup>[8]</sup>, 本文采用模型参考自适应模糊控制对  $H$  的取值进行处理, 使  $H$  跟随车辆运动情况实时调整。

如图 2 所示, 将控制量  $\tau$  分别传递给理想情况下的参考模型和实际车况, 算出相应的速度  $\hat{\eta}_e$  和  $\eta_e$ ; 将二者差值  $E_D$  送入自适应机构得出扰动估计  $\hat{D}$  后送入模糊控制器, 按照模糊化-模糊推理-解模糊的流程得出新的  $H$  值, 送入式 (14) 进行下一轮运算。具体过程如下:

在不考虑外部干扰并假设建模精确的情况下, 参考模型可表述为:

$$\dot{\bar{M}} \eta + \bar{C} \eta + \bar{R} = \bar{B} \tau \quad (20)$$

将  $\tau$  分别带入式 (2)、(20), 计算得到相应的速度量  $\hat{\eta}_e$  和  $\eta_e$ 。从式 (2) 与式 (20) 的形式来看,  $\hat{\eta}_e$  与  $\eta_e$  间差值  $E_D$  源自干扰项  $\bar{\tau}_d$ , 因此, 用  $E_D$  对  $\bar{\tau}_d$  进行估计。

令  $E_D = \hat{\eta}_e - \eta_e$ , 设计自适应控制律:

$$\hat{D} = \sigma (|\dot{E}_D| + \lambda |E_D|) \quad (21)$$

$\sigma$  为参数可调正定矩阵。从式 (21) 的形式来看,  $\hat{D}$  为正定; 误差的绝对值越大, 变化越快, 得出的估计值越大, 符合控制要求。

图 2 中的模糊控制器 (fuzzy controller) 输入量为  $\hat{D}$ , 输出量为  $H$ 。加入模糊控制前进行多次试验, 获取  $\hat{D}$  的大致范围, 并结合控制律稳定性分析中的限定条件得出  $H$  的取值范围; 采用三角形隶属函数分别将  $\hat{D}$  和  $H$  模糊化为 5 级, 相应的语言变量分别是:  $Z$  (零),  $S$  (小),  $M$  (中),  $B$  (大),  $L$  (很大)。

由  $H$  与  $\hat{D}$  间的正相关性, 制定模糊规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则

$\hat{D}$	$Z$	$S$	$M$	$B$	$L$
$H$	$Z$	$S$	$M$	$B$	$L$

采用重心法进行解模糊化<sup>[8]</sup>:

$$u = \frac{\int x \mu_n(x) dx}{\int \mu_n(x) dx} \quad (22)$$

可见, 对于任意情况下的  $\hat{D}$ , 模糊控制器均能按既定规则得到相应的  $H$  来对滑模补偿量进行调整: 既可避免“抖振”出现, 又可提升跟踪效果。本文的模糊控制器采用单输入单输出模式, 规则数少, 运算负担较小。

### 3 算法仿真

由于运动学控制律的跟踪效果在文献 [5] 中已得到验证, 在仿真对比中, 运动学部分均采用式 (14) 给出的控制律, 动力学控制部分将本文算法与常规 PD 控制进行对比分析, 以验证本文算法有效性。

经实测和查阅相关资料得到基本参数: 车体质量  $m = 1700 \text{ kg}$ , 转动惯量  $I = 1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , 轮距  $b = 0.8 \text{ m}$ , 车轮半径  $r = 0.368 \text{ m}$ ; 侧向摩擦系数  $\mu_s = 0.15$ , 纵向摩擦系数  $\mu_l = 0.6$ , 重力加速度  $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

参考曲线参数取:  $v_r = 1 \text{ m/s}$ ,  $\omega_r = 0.1 \text{ rad/s}$ ;  $(X_{r(0)}, Y_{r(0)}, \theta_{r(0)}) = (30, 0, \pi/2)$ , UGV 初始点位姿为  $(25, 0, 0)$ 。

控制参数取:  $K_v = 0.8, K_\omega = 2, x_{ICR} = 0.3 \text{ m}$ ;

$$P = \begin{bmatrix} 5000 & & \\ & 2000 & \\ & & 2000 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 200 & & \\ & & \\ & & 300 \end{bmatrix}, \lambda = \begin{bmatrix} 2000 & & \\ & 10 & \\ & & 10 \end{bmatrix}, \Theta = \begin{bmatrix} 10 & & \\ & & \\ & & 10 \end{bmatrix}$$

干扰设置为:  $\bar{\tau}_d = \begin{bmatrix} 100 \sin t \\ & & \\ & & 100 \cos t \end{bmatrix}$ 。

仿真结果如图 3~图 7 所示。

由图 3 可见, 在存在外界干扰的情况下, 常规 PD 控制的跟踪效果受到较大影响, 误差始终不能收敛, 而本文提出的 PD-MRAFSMC 算法误差收敛速度快, 稳态误差较小; 由图 7 ~ 图 9 可见, 速度和角速度误差收敛情况好, 补偿量可随扰动变化实时调整, 弥补了常规 PD 控制控制精度差的不足, 有效提升了速度环跟踪精度和整体的鲁棒性; 由图 10 可见, 本文算法电机扭矩分配合理, 可行性较好。

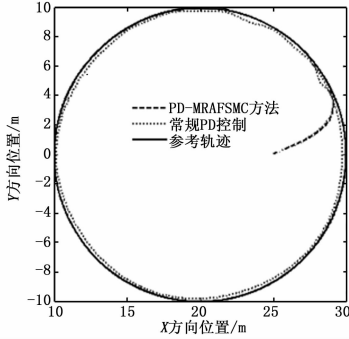


图 3 跟踪效果对比

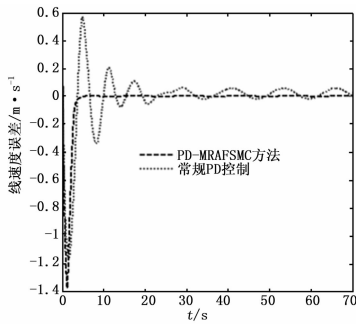


图 4 线速度误差

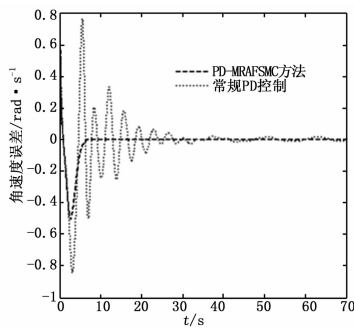


图 5 角速度误差

## 4 结论与展望

本文针对无人地面车辆轨迹跟踪精度不高, 鲁棒性差的问题提出了一种基于补偿控制的运动学与动力学相结合的控制算法。该算法优点在于动力学控制部分采取模型参考自适应模糊滑模与 PD 控制相结合的算法, 既具备 PD 控制简单易行之优势, 又能达到较好的鲁棒性, 适用于无人地面车辆的轨迹跟踪。本文提出的算法中设定左右侧车轮转速保持一致, 车辆运行状况较为理想化, 具有一定的局限性; 在以后的研究工作中将进一步考虑 6 轮独立控制的轨迹跟踪策略, 并将更多的诸如

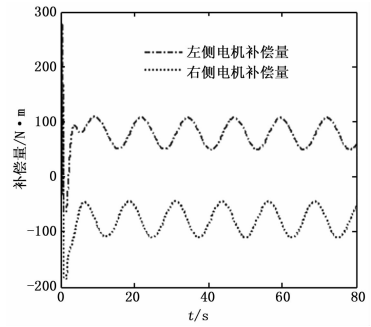


图 6 补偿量变化曲线

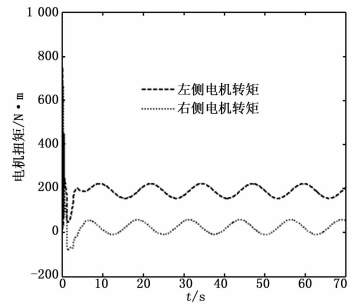


图 7 电机转矩变化曲线

重心偏移、路面坡度、滑转滑移等因素纳入研究范围, 探求更加智能高效且简单易行的控制方法。

## 参考文献:

- [1] Kanayama Y, Kimura Y, Miyazaki F. A Stable Tracking Control Method for Autonomous Mobile Robot [A]. Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Cincinnati, USA: IEEE Computer Society Press, 1990: 384 - 389.
- [2] Amoozgar M H, Sadati S H, Alipour K. Trajectory tracking of wheeled mobile robots using a kinematical fuzzy controller [J]. International Journal of Robotics and Automation, 2012, 27 (1): 49 - 56.
- [3] Mohareri, Omid, Dhauadi, et al. Intelligent neural network based controllers for path tracking of wheeled mobile robots: A comparative analysis [A]. 2010 8th IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments [C]. Phoenix, AZ, United states: IEEE Computer Society, 2010: 34 - 39.
- [4] Kozłowski K, Pazderski D. Modeling and control of a 4 - wheel skid-steering mobile robot [J]. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2004, 14 (4): 477 - 496.
- [5] 王 恒, 胡军中, 闫永宝等. 一种运动学控制律的无人地面车辆轨迹跟踪方法 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2014, 28 (2): 62 - 65.
- [6] Zhu A M. Neuro-Dynamics and Neuro-Fuzzy based Approaches to Real-time Motion Planning and Control of Mobile Robot Systems [D]. University of Guelph, Canada. 2005: 85 - 99.
- [7] 孙 亮, 孙启兵. 滑模控制在两轮机器人平衡控制中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (7): 1543 - 1544.
- [8] 戎月莉. 计算机模糊控制原理及应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995.