

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201606021



# 智能车辆导航系统的模糊控制方法

廖德利

(南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167)

**摘要:** 针对背景噪声及转弯曲率变化对智能车辆导航系统的横摆角速度控制精度影响较大的问题,提出一种智能车辆导航系统的模糊控制方法.首先,进行不同坐标系的坐标变换,将目标车辆实际的物理坐标信息变换到易于建模处理的车辆局部坐标系;接着,通过计算预瞄路径的非线性函数实时构建了目标虚拟路径,并给出了车辆目标路径的横摆角速度变化率;最后,以期望横摆角速度和整车质心侧偏角作为模糊控制器的输入,以车辆行驶两轮差速值作为模糊控制器的输出,设计导航模糊控制系统.计算机仿真和实测结果表明:文中方法具有较高的控制精度.

**关键词:** 智能车辆; 导航系统; 模糊控制; 横摆角速度; 坐标变换

**中图分类号:** TP 242.6; TP 391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2016)06-0766-04

## Fuzzy Control Method of Intelligent Vehicle Navigation System

LIAO Deli

(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** In view of the intelligent vehicle yaw angular velocity poor control precision problem, which come from the background noise and turn the curvature change, this paper proposes a fuzzy control method of intelligent vehicle navigation system. Firstly, this method transforms the vehicles physical coordinate to the vehicle local coordinates. Secondly, the method calculates and analysis the yawing angular velocity change rate of vehicle target path, which based on building target virtual path in real-time. Finally, a fuzzy controller is set with desired yaw angular velocity change rate and the vehicle mass center side-slip angle deviation as in put, and differential speed value of vehicle as output. The computer simulation analysis and experiment shows that the proposes method has high control accuracy and anti-interference ability.

**Keywords:** intelligent vehicle; navigation system; fuzzy control; yaw angular velocity; coordinate transformation

实时精确的控制技术是智能车辆导航系统的关键所在<sup>[1]</sup>,但是,由于车辆导航系统受侧偏信息的影响,导致现有控制技术在不同曲率的道路和不同车速情况下的控制精度差异较大,很难满足车辆控制系统在不同路况环境下的高精度控制需求<sup>[2]</sup>.王家恩等<sup>[3]</sup>采用近距离瞄准的方法,但是在实验场景中的控制精度较差.Kozłowski 等<sup>[4]</sup>基于车辆运动模型构建了模型优化控制方法,但是实时性变差.在此基础上,Pongsathorn 等<sup>[5]</sup>基于极大极小准则,联合预瞄点的方法,有效克服了模型漂移误差的影响,但是无法实现全智能控制反馈<sup>[6]</sup>.为了克服模型漂移的影响,Pentzer 等<sup>[7]</sup>提出了基于期望横摆角速度的模型控制方法,但是在车辆速度较快的情况下仍然存在模型误差漂移问题<sup>[8]</sup>.针对现有智能车辆导航控制方

**收稿日期:** 2016-10-20

**通信作者:** 廖德利(1975-),男,实验师,博士,主要从事电气工程及其自动化的研究. E-mail:ldelly@163.com.

**基金项目:** 江苏省高校自然科学基金资助项目(15KJB470005)

法无法满足控制精度和实时性的折中,本文提出一种新的模糊控制方法.

## 1 基础知识

### 1.1 车辆动力学方程

智能车辆在实际运行过程中的动力学方程<sup>[9]</sup>可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_c &= v\cos(\phi_c + \beta), \\ \dot{Y}_c &= v\sin(\phi_c + \beta), \\ \dot{\phi}_c &= \omega. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中:  $(X_c, Y_c)$  为车辆质心在物理坐标系的坐标;  $\phi_c$  为车辆纵轴线与横向坐标的夹角;  $v$  为整车质心速度;  $\omega$  为车辆在该时刻的横摆角速度;  $\beta$  为整车质心侧偏角. 由式(1)可知: 车辆的位置信息主要由  $v, \beta$  和  $\omega$  确定. 但是车速  $v$  本身就包含了侧偏角度信息, 因此, 主要考虑横摆角速度和质心速度对车辆导航控制精度的影响.

### 1.2 车辆坐标变化

为进行仿真分析, 主要将车辆的实际物理坐标信息变换到车辆计算仿真的局部坐标系中, 如图 1 所示. 图 1 中:  $O_p(X_p, Y_p)$  为车辆物理坐标系  $OXY$  中的选择预瞄点;  $\phi_p$  为横坐标与该点连线的夹角;  $(X_p, Y_p, \phi_p)$  为车辆和该点在物理坐标系中的相对位置坐标信息;  $(x_e, y_e, \phi_e)$  为在车辆局部坐标系中的相对位置坐标信息. 由图 1, 车辆局部坐标系  $O_cX_cY_c$  中建立车辆质心与点  $O_p$  的相对位置计算方程<sup>[10]</sup>为

$$p_e = \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ \phi_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi_c & \sin \phi_c & 0 \\ -\sin \phi_c & \cos \phi_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_p - X_c \\ Y_p - Y_c \\ \phi_p - \phi_c \end{pmatrix}. \quad (2)$$

式(2)中:  $x_e$  为预瞄点距离值;  $y_e$  和  $\phi_e$  分别为车辆局部变换坐标系中整车质心与预瞄点之间的横向差值和方位角差值.

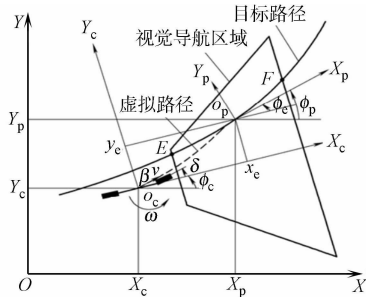


图 1 车辆物理坐标

Fig. 1 Vehicle physical coordinate

## 2 模糊控制分析及实现

### 2.1 预瞄路径的计算

在  $O_cX_cY_c$  坐标系中假设车辆沿着坐标系纵轴方向行驶, 则预瞄路径的非线性方程可以表示为

$$y(x) = A + Bx + Cx^2 + Dx^3. \quad (3)$$

在忽略车辆质心侧偏角信息的条件下, 可以将预瞄路径方程的已知信息<sup>[11]</sup>表示为

$$\left. \begin{aligned} y(0) &= 0, & y(x_e) &= y_e, \\ \dot{y}(0) &= 0, & \frac{\ddot{y}}{(1 + \dot{y}^2)^{3/2}} \Big|_{x=0} &= \rho. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)中:  $\rho$  为车辆转弯行驶曲率;  $A, B, C, D$  为系数参量. 由式(3), (4), 预瞄路径为

$$y(x) = \frac{\omega}{2v}x^2 + \frac{y_e - \frac{\omega}{2v}x_e^2}{x_e^3}x^3. \quad (5)$$

### 2.2 横摆角速度的计算

为了设计相应的模糊控制模块, 根据式(5)给出的车辆预瞄路径函数, 结合坐标变换的结果, 在车辆坐标系中, 车辆行驶的曲率<sup>[8]</sup>为

$$\rho = \frac{\ddot{y}}{(1 + \dot{y}^2)^{3/2}} \Big|_{x=0}. \quad (6)$$

式(6)中:  $(x, y)$  为车辆在  $y(x)$  上的坐标位置, 则  $\rho$  的变化率  $\dot{\rho}$  为

$$\dot{\rho} = v \frac{d\rho/dx}{ds/dx}. \quad (7)$$

实际的车辆运行过程中会存在很多曲率改变的情况, 车辆行驶过程中的控制目的是为了保持道路

曲率和车辆曲率的拟合,因此,横摆角速度为 $\omega_d=\dot{v}\rho$ .

2.3 模糊控制规则

根据模糊控制方法的要求,将 $\omega_d$ 的论域集合表示为正(P)、负(N)和零(O);将 $\beta$ 和 $\Delta v$ 的论域集合表示为7个模糊子集.其中:ZO表示零值;PB表示正大;PM表示正中;PS表示正小;NB表示负大;NM表示负中;NS表示负小.

根据模糊输入输出变量,整个车辆导航系统的模糊控制规则汇总,如表1所示.表1中: $\beta\in[-60^\circ, 60^\circ]$ ;  $\Delta v\in[-0.2, 0.2],\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $\omega_d\in[-0.5,0.5],\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ .

表1 模糊控制规则  
Tab.1 Fuzzy control rule

论域	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PN
N	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
O	PB	PM	ZO	ZO	ZO	NM	NB
M	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB

3 仿真分析

基于 Matlab/Simmulink 构建了验证控制算法的仿真模型,车辆整体参数,如表2所示.仿真分析中规定 $\beta$ 前行左偏为正,右偏为负,且采用单点预瞄的方法,车速为 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .为便于定性和定量对比分析,将文中方法的控制精度同文献[7]的模型控制(model control,MC)方法、文献[8]的期望横摆角速度(desired yaw rate,DYR)控制方法进行了对比分析.具体的仿真结果,如图2~5所示.图2~5中: $s$ 为位移; $\omega_d$ 为横摆角速度; $\phi_e$ 为方位偏差; $d$ 为距离偏差值.

表2 仿真参数  
Tab.2 Simulation parameters

参数	仿真数值	参数	仿真数值
整车质量/kg	97	前后轮纵向刚度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	152/150
转动惯量 $I_z/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	1 042	质心高度/m	0.453
质心的前后轴距/m	0.4/0.7	轮胎滚动半径/m	0.3
前后轮距/m	0.9	预瞄点距离/m	18
前后轮侧偏刚度/ $\text{kN}\cdot\text{rad}^{-1}$	-97/-78		

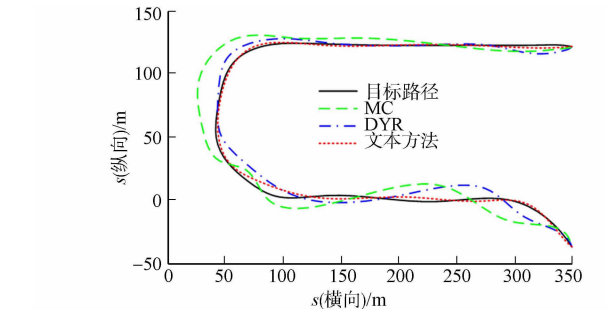


图2 仿真轨迹导航跟踪结果

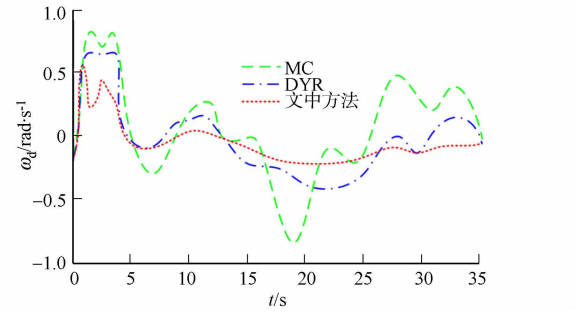


图3 横摆角速度变化率曲线

Fig.2 Simulation track and navigation tracking results      Fig.3 Change curve of the yaw angular velocity

由图2可知:实际的导航曲线包含了直线部分和具有不同曲率的曲线运行部分;在直线部分,3种方法在整体的导航效果上都保持了较高的控制精度.由图3,4可知:MC方法由于存在模型漂移误差累积效应的影响,在后期跟踪结果明显变差,特别是在具有曲率变化的转弯路径时段,由于误差累积效应的影响,MC方法会产生较大的误差累积效应,而且无法自适应的适应不同转弯曲率的变化需求,在第一次出现转弯运动的时刻开始,MC方法就出现了导航误差漂移问题;DYR方法由于采用了滑移模块控制的方法,虽然能够保持稳定的收敛特性,但是无法收敛到最佳值,主要是因为该方法受背景噪声干扰比较严重,因此,即使跟踪精度保持了较高的拟合,还存在传感器本身的噪声效应;文中方法的实时路径修正能力克服了传统的模型误差累积效应,保持了较高的拟合精度.由图3~5可知:虽然DYR方法

也保持了较高的拟合精度,但是该方法无法收敛于 0,加上控制参量的模糊控制,本身可以消除传感器的噪声扰动,保持了较好的 0 值收敛状态.

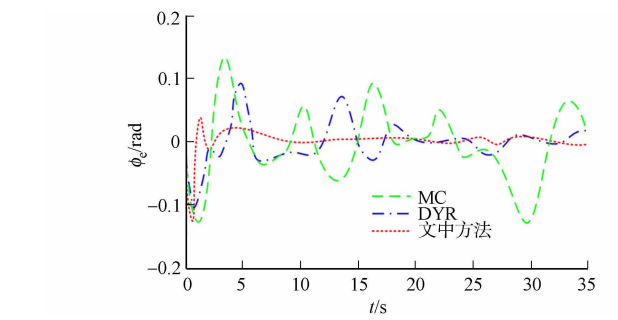


图 4 方位偏差曲线  
Fig. 4 Azimuth deviation curve

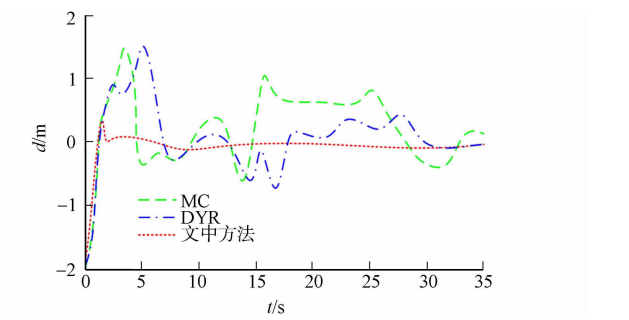


图 5 距离偏差曲线  
Fig. 5 Distance deviation curve

## 4 结束语

针对智能车辆导航控制问题,提出了一种横摆角速度的模糊控制方法.该方法首先推导分析了期望横摆角速度变化率.通过将车辆物理坐标变换到车辆局部坐标,在实时构建目标虚拟路径的基础上计算了期望横摆角速度变化率.并以期望横摆角速度变化率和整车质心侧偏角作为模糊控制器的输入,行驶车辆两轮的差速值作为模糊控制器的输出,设计了模糊控制系统.计算机仿真验证了文中方法具有较高的控制精度,在直线和曲线定位导航两种情况下均保持了较高的导航精度和稳定性.

### 参考文献:

[1] 李刚,韩海兰. 四轮轮毂电机电动车横摆力矩参数自调整模糊控制[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2015,36(4): 365-370.

[2] 宋国杰. 采用自适应模糊 PID 的二阶倒立摆控制[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2016,37(1):74-78.

[3] 王家恩,陈无畏,王檀彬,等. 基于期望横摆角速度的视觉导航智能车辆横向控制[J]. 机械工程学报,2012,48(4): 108-115.

[4] KOZLOWSKI K,PAZDESKI D. Modeling and control of a 4-wheel skid-steering mobile robot[J]. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science,2004,12(4):477-496.

[5] PONGSATHORN R,MASAO N,MOTOKI S. Lane keeping control strategy with direct yaw moment control input by considering dynamics of electric vehicle[J]. Vehicle System Dynamics,2006,44(3):192-201.

[6] ANI O A,XU He,SHEN Yiping,et al. Modeling and multi-objective optimization of traction performance for autonomous wheeled mobile robot in rough terrain[J]. Journal of Zhejiang University,2013,14(1):11-29.

[7] PENTZER J,BRENNAN S,REICHARD K. Model-based prediction of skid-steer robot kinematics using online estimation of track instantaneous centers of rotation[J]. Journal of Field Robotics,2014,31(3):455-476.

[8] YANAGIYA M,TOMITA K,TSUGAWA S. Effects of field of view on lateral control performance in a vision-based autonomous vehicle[J]. JSAE Review,1999,20(4):499-504.

[9] 高振海. 汽车方向预瞄式自适应 PID 控制算法[J]. 机械工程学报,2004,40(5):101-105.

[10] 孟庆宽,仇瑞承,张漫,等. 基于改进粒子群优化模糊控制的农业车辆导航系统[J]. 农业机械学报,2015,46(3):29-36.

[11] YU W,CHUY O,COLLINS E G,et al. Analysis and experimental verification for dynamic modeling of a skid-steered wheeled vehicle[J]. IEEE Transactions on Robotics,2010,26(2):340-353.

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 崔长彩)