

智能车辆换道与超车轨迹跟踪控制^{*}

游 峰 王荣本 张荣辉 熊文华

【摘要】 智能车辆换道过程中须同时考虑车辆的横向控制和纵向控制,为实现智能车辆对预定轨迹的稳定跟踪,根据智能车辆的车辆运动学简化模型,建立基于刚体的车辆模型。选取车辆当前位姿和参考位姿构造动态的位姿误差,建立智能车辆轨迹跟踪闭环控制系统状态空间数学模型。基于 Backstepping 控制算法选取 Lyapunov 函数设计智能车辆换道及超车轨迹跟踪控制器。仿真和试验结果表明,所设计的控制器能够快速跟踪参考轨迹,控制器在智能车辆换道及超车控制过程中平稳、可靠。

关键词: 智能车辆 换道与超车 轨迹跟踪 Backstepping 控制设计

中图分类号: TP242.6⁺2 **文献标识码:** A

Lane Changing and Overtaking Control Method for Intelligent Vehicle Based on Backstepping Algorithm

You Feng¹ Wang Rongben² Zhang Ronghui² Xiong Wenhua¹
(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China
2. Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract

To guarantee intelligent vehicle (IV) track preconcerted trajectory steadily, according to IV's simplified model of kinematics, IV model that based on rigid body model was established firstly. Then current and reference posture to develop the dynamic posture error of IV were selected. And state space mathematics model of IV has been constructed to track trajectory closed loop control system by the adopted posture error. Based on Backstepping control algorithm, Lyapunov function has been chosen and controller for IV lane changing and overtaking was designed. Simulation and experiment result showed that the controller designed by this method could track preconcerted trajectory quickly, it is steady and reliable during IV's lane changing and overtaking control course.

Key words Intelligent vehicle, Lane changing and overtaking, Trajectory tracking, Backstepping, Control design

引言

目前换道方面的研究仅局限于基于车辆换道模型的交通流宏观、微观仿真和换道预警或简化车辆换道自动控制^[1]。智能车辆的自动换道(超车)控制涉及到换道环境的感知,换道时机确定和换道控制策略的制定等,包含车辆的横向控制和纵向控制,是国内外智能车辆实现自动驾驶的难点之一^[2~5]。

论文从车辆主动安全性的角度出发,立足于我国的汽车交通现状和技术条件,在智能车辆的安全保障技术领域进行了一些积极有益的探索,实现智能车辆对预先定义的换道和超车轨迹的稳定跟踪。

1 车辆运动学模型

为了简化控制器的设计,本文假设^[6]: ①将整个车辆视为刚体,车轮视为刚性轮。②在车辆运动

收稿日期: 2007-05-09
^{*}国家自然科学基金资助项目(项目编号: 50175046)和教育部科学技术研究重点项目(项目编号: 00037)
游 峰 华南理工大学交通学院 讲师 博士, 510640 广州市
王荣本 吉林大学交通学院 教授 博士生导师, 130025 长春市
张荣辉 吉林大学交通学院 硕士生
熊文华 华南理工大学交通学院 硕士生

速度较低而转向半径较大时, 所有车轮在运行平面上作纯滚动运动, 不考虑轮胎与地面的侧向滑动。

③不考虑地面凹凸不平对运动轨迹的影响。④所有车轮在车辆运行表面有足够的摩擦力, 在车辆运行的过程中, 使车轮不会产生相对的滑动。

根据车辆转向原理, 车轮角速度为

$$\dot{\theta}_c = \frac{v_c}{L} \tan \delta = \omega_c \tag{1}$$

式中 L ——车辆轴距 δ ——转向轮转角
 v_c ——车辆轮轴中心处的车速
 ω_c ——车轮的角速度

控制对象采用两个后轮作为驱动轮, 两个前轮是转向轮的 Cybercar 智能车辆。

Cybercar 运动具有方向性, 假定其在空间二维平面上运动, 因此用两个独立的平面坐标系共同描述出智能车辆在某时刻的空间位置与朝向, 如图 1 所示。

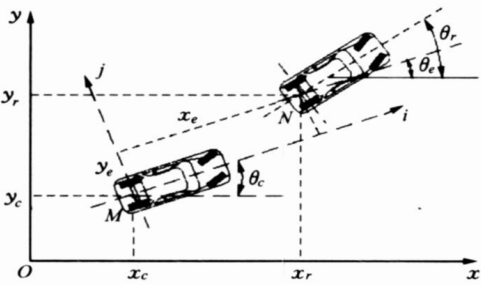


图 1 全局坐标下车辆实际位姿与参考位姿

Fig. 1 Actual posture with reference posture of vehicles in the world coordinates

假设 Cybercar 在道路平面上作纯滚动、无侧滑的运动, 则车辆所受运动约束为

$$\dot{x}_c \sin \theta - \dot{y}_c \cos \theta = 0 \tag{2}$$

在世界坐标系 Oxy 中, Cybercar 的当前位姿可由向量 $p_c = [x_c, y_c, \theta_c]^T$ 来表示, $p_c \in \mathbf{R}^3$, 其中 (x_c, y_c) 为参考点 M 在世界坐标系中的坐标, θ_c 为沿 x 轴逆时针旋转与车辆纵向中轴相重合时所得到的角度, 可定义为局部坐标系 Mij 与世界坐标系 Oxy 的夹角^[7]。Cybercar 的运动由线速度 v_c 和角速度 ω_c 来表达, 沿 x 轴正向运动时 v_c 为正, 反之为负。角速度 ω_c 是 Cybercar 在局部坐标系下的角速度, 逆时针为正, 反之为负。设控制向量为 $u_c = [v_c, \omega_c]^T$, $v_c > 0$, $v_c \in \mathbf{R}^1$, $\omega_c \in \mathbf{R}^1$, u_c 是时间的函数。以 M 点为基准的车辆运动学模型为

$$\dot{p}_c = \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & 0 \\ \sin \theta_c & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} \tag{3}$$

设
$$J = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & 0 \\ \sin \theta_c & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

式(3)改写
$$\dot{p}_c = J u_c \tag{5}$$

式中 J ——车辆系统的雅可比矩阵

2 车辆位姿误差模型

式(3)表明了控制变量与状态变量的关系, 但无法确定控制变量与车辆位姿误差之间的关系, 而采用车辆位姿误差构造其轨迹跟踪闭环控制系统状态空间方程是轨迹跟踪控制系统的数学描述, 是车辆控制律和控制系统稳定性分析的基础和前提^[8]。设参考车辆位姿为 $p_r = [x_r, y_r, \theta_r]^T$, 其中 $[x_r, y_r]^T$ 为参考车辆点 N 的坐标, θ_r 为 Cybercar 的运动方向角。在以 Cybercar 为参考的局部坐标系 Mij 中, 车辆运动的误差为 $p_e = [x_e, y_e, \theta_e]^T$ 可表示为

$$p_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c & 0 \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_c \\ y_r - y_c \\ \theta_r - \theta_c \end{bmatrix} = J_1 q_e$$

展开后经推导可得

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= \omega_c y_e - v_c + v_r \cos \theta_e \\ \dot{y}_e &= -x_e \omega_c + v_r \sin \theta_e \\ \dot{\theta}_e &= \omega_r - \omega_c \end{aligned}$$

即得到 Cybercar 位置误差微分方程为

$$\dot{p}_e = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_c y_e - v_c + v_r \cos \theta_e \\ v_r \sin \theta_e - \omega_c x_e \\ \omega_r - \omega_c \end{bmatrix} \tag{6}$$

3 轨迹跟踪控制器设计

Cybercar 换道和超车轨迹的跟踪控制需同时考虑车辆的两种位姿^[9~10]: 即参考位姿 $p_r = [x_r, y_r, \theta_r]^T$ 和当前位姿 $p_c = [x_c, y_c, \theta_c]^T$ 。跟踪控制问题主要是使 Cybercar 在任意初始误差下, 确定车辆的输入控制 $u_c = [v_c, \omega_c]^T$, 从而跟踪参考位姿 $p_r = [x_r, y_r, \theta_r]^T$ 和参考输入 $u_r = [v_r, \omega_r]^T$, 使得 $[x_e, y_e, \theta_e]^T$ 有界和 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|[x_e, y_e, \theta_e]^T\| = 0$ 。

由于车辆存在非完整性特性, 采用以往线性控制理论很难达到预定的控制效果。而积分 Backstepping 方法^[10] 是近十年来发展的一种非线性系统稳定设计理论, 该方法将复杂非线性系统分解为多个子系统, 首先设计最基本子系统的稳定控制器, 把每个子系统将状态坐标的变化(即虚拟控制量)和预先构造的 Lyapunov 函数联系起来, 然后通过积分器后推、逐步修正, 最终设计出全局一致渐近稳定性的

跟踪控制器。鉴于此, 论文采用积分 Backstepping 方法, 在局部坐标系下以直角坐标表示法构建 Cybercar 闭环系统的位姿误差模型, 为 Cybercar 换道轨迹和超车轨迹跟踪控制设计光滑连续的非线性状态反馈控制律。然后用 Lyapunov 函数证明在该控制律作用下, Cybercar 闭环系统在原点具有全局一致渐近稳定性。因此 Cybercar 跟踪控制器的设计转化为寻求控制量 $u_c=[v_c, \omega_c]^T$, 使得 $x_e \rightarrow a_1 f(k\omega_c)y_e, y_e \rightarrow 0$ 。构造如下的 Lyapunov 函数

$$V=\frac{1}{2}x_e^2+\frac{1}{2}y_e^2+\frac{2}{a_y}\left(1-\cos\frac{\theta_e}{2}\right) \tag{7}$$

取系统的控制律为

$$\begin{aligned} \omega_c &= \omega_r + 2a_y y_e v_r \cos\frac{\theta_e}{2} + a_0 v_r \sin\frac{\theta_e}{2} \\ v_c &= v_r \cos\theta_e + a_1 f(k\omega_c) \omega_c x_e - a_1 f(k\omega_c) v_r \sin\theta_e + \\ &\quad a_x x_e - a_1 a_x f(k\omega_c) y_e - a_1 k(1-f^2(k\omega_c)) \dot{\omega}_c y_e \end{aligned} \tag{8}$$

则有

$$\dot{V}=-a_x \dot{x}_e^2-a_1 \omega_c f(k\omega_c) y_e^2-\frac{a_0}{a_y} v_r \sin^2\frac{\theta_e}{2} \tag{9}$$

由式(9)可知, 由于 $a_0, a_1, a_x, a_y \in (0, \infty)$, 且 $\omega_c f(k\omega_c)$ 总大于零, 则式(9)中 $\dot{V} \leq 0$ 。因为 Lyapunov 函数 V 是连续可微正定函数并且有界, \dot{V} 为半负定且一致连续函数。当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\dot{V} \rightarrow 0$, 这说明 $\dot{x}_e^2(t), y_e^2(t), \omega_c f(k\omega_c) y_e(t), \sin^2\frac{\theta_e}{2}$ 分别趋近零。 $\sin^2\frac{\theta_e}{2} \rightarrow 0$ 则 $\lim_{t \rightarrow \infty} \theta_e = 0$ 。而 $\lim_{t \rightarrow \infty} x_e = 0$ 即 $x_e \rightarrow a_1 f(k\omega_c) y_e$ 。由于 v_r, ω_r 不同时为零, 由控制律知 ω_c 不恒等于零且 $\omega_c f(k\omega_c) y_e(t) \rightarrow 0$, 得 $y_e \rightarrow 0$ 。综上分析有 $x_e \rightarrow 0$ 。由 Lyapunov 稳定判据知, 在如式(8)所示的控制律作用下, Cybercar 在全局范围内其跟踪误差 $[x_e, y_e, \theta_e]^T$ 有界且 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|[x_e, y_e, \theta_e]^T\| = 0$, 即上述跟踪系统是稳定的。

为避免由于车辆速度或加速度太大引起车轮打滑, 在控制律中引入控制策略

$$\omega_c = \begin{cases} \omega_c & (|\omega_c| < |\omega_{\max}|) \\ \omega_{\max} & (|\omega_c| \geq |\omega_{\max}|) \end{cases} \tag{10}$$

$$v_c = \begin{cases} v_c & (|v_c| < |v_{\max}|) \\ v_{\max} & (|v_c| \geq |v_{\max}|) \end{cases} \tag{11}$$

确保 Cybercar 运动平滑。

4 仿真分析与试验验证

首先对直线、圆参考轨迹进行跟踪控制仿真; 在此基础上进行换道和超车轨迹跟踪控制的仿真。直

线轨迹跟踪仿真如图 2 所示, 初始位姿误差 $[x_e, y_e, \theta_e]^T = [5, -2, -\pi/3]^T$, 参考速度 $[v_r, \omega_r]^T = [5, 0]$, 直线参考轨迹为 $y = x$ 。圆参考轨迹跟踪仿真结果如图 3 所示, 初始位姿误差 $[x_e, y_e, \theta_e]^T = [15, -3.5, \pi/3]^T$, 期望圆轨迹为 $x^2 + y^2 = 40^2$, 参考线速度 $v_r = 5$ 。换道和超车轨迹跟踪仿真如图 4 所示, 初始位姿误差 $[x_e, y_e, \theta_e]^T = [3, 1, -\pi/3]^T$ 。各图中实线表示参考轨迹, 虚线表示车辆跟踪轨迹。图中仿真结果都是在同一组控制器参数, 即 $(a_1, a_x, a_y, a_0, k) = (1.5, 2.5, 0.2, 2.5, 6.8)$ 得到的, 车辆的跟踪轨迹与参考轨迹重合表明在所设计的控制率作用下, 车辆在有限的时间内, 能快速的跟踪预先定义的参考轨迹, 使系统跟踪误差快速收敛, 具有良好的全局稳定性, 如式(8)所示的控制律是有效的。

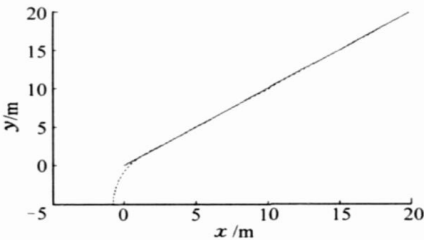


图 2 直线跟踪仿真

Fig. 2 Line tracking simulation

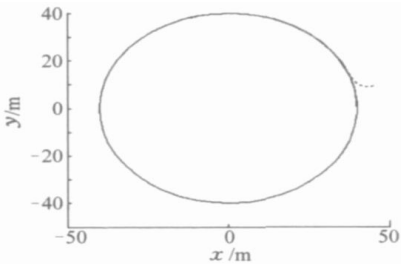


图 3 圆轨迹跟踪仿真

Fig. 3 Circle tracking simulation

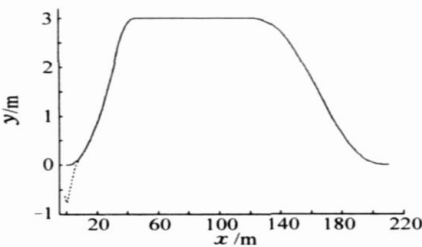


图 4 换道和超车轨迹跟踪仿真

Fig. 4 Lane changing and overtaking simulation

基于本文设计的轨迹跟踪控制器, 作者进行了多次校区试验, 车辆的位移通过光电编码器实际测量, θ_c 由图像给出。为了保证车辆换道和超车运动控制的平滑, 对车辆控制量的输出加以限制 $v_{\max} = 3 \text{ m/s}$, $\omega_{\max} = 0.2 \text{ rad/s}$ 。图 5 描述 x_e, y_e, θ_e 误差随时间变化的情况。从图中可知, 在跟踪控制器的作

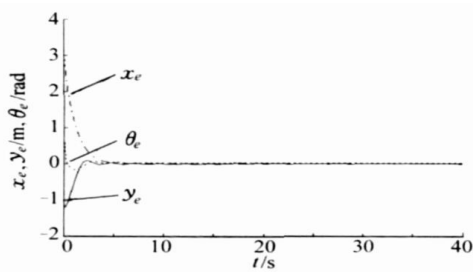


图 5 x_e, y_e, θ_e 随时间 t 变化的曲线

Fig. 5 Curves of x_e, y_e, θ_e by t

用下,描述车辆跟踪轨迹性能的 3 种误差迅速趋近到零附近,系统具有很强的收敛于平衡位置的能力,表明本文设计的跟踪控制器是稳定、有效的。

5 结束语

针对 Cybercar“纯滚动无滑动”约束条件,设计了在笛卡尔坐标系下基 Backstepping 的全局渐进稳定的控制器。仿真分析和试验结果表明,本文设计的控制器是有效、可行的,具有良好的跟踪效果。

参 考 文 献

1 Daganzo C F. A behavioral theory of multi-lane traffic flow, part I: long homogeneous freeway sections[J] . Transportation Research, Part B, 2002, 36(2): 131~158.

2 Rickert M, Nagel K, Schreckenberg M, et al . Two lane traffic simulations using cellular automata[J] . Physica A, 1996, 231(4): 687~698.

3 Wager P, Nagel K, Wolf D E. Realistic multi-lane traffic rules for cellular automata[J] . Physica A, 1997, 234(3~4): 687~698.

4 王荣本, 张荣辉, 储江伟, 等. 区域交通智能车辆控制器优化设计和品质分析[J] . 农业机械学报, 2007, 38(1): 22~25. Wang Rongben, Zhang Ronghui, Chu Jiangwei, et al. Optimizing design and quality analysis for cybercar controller[J] . Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1): 22~25. (in Chinese)

5 金立生, 王荣本, 纪寿文, 等. 智能车辆自主导航神经网络控制器设计[J] . 农业机械学报, 2005, 36(10): 30~33. Jin Lisheng, Wang Rongben, Ji Shouwen, et al. Neural network controller design for autonomous navigation of intelligent vehicle based on vision[J] . Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 30~33. (in Chinese)

6 Ruder M. Highway lane change assistant[C] //IEEE International Conference on Intelligent Vehicle, 2000: 17~22.

7 Rajamani Rajesh. Demonstration of integrated longitudinal and lateral control for the operation of automated vehicles in platoons[C] //IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000: 695~708.

8 Thomas Hessburg. Fuzzy logic control for lane change maneuvers in lateral vehicle guidance[R] . University of California, 1995: 2~10.

9 Lin. Automobile steering autopilot with lane change capability[C] //Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2000: 64~69.

10 Frerro R. Control of a nonholonomic mobile robot: Backstepping kinematics into dynamics[C] //IEEE Proceedings of 34th Conference on Decision and Control, 1995: 3 805~3 810.

(上接第 16 页)

6 李德钢, 黄震, 乔信起, 等. 压缩比对二甲醚燃料均质压缩燃烧的影响[J] . 农业机械学报, 2005, 36(10): 5~8. Li Degang, Huang Zhen, Qiao Xinqi, et al. Evaluation on effects of compression ratio on DME HCCI combustion experiments[J] . Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 5~8. (in Chinese)

7 李德钢, 黄震, 乔信起, 等. 二甲醚燃料均质压燃燃烧研究[J] . 内燃机学报, 2005, 23(2): 193~198. Li Degang, Huang Zhen, Qiao Xinqi, et al. Study on HCCI combustion fueled with DME[J] . Journal of Internal Combustion Engine, 2005, 23(3): 193~198. (in Chinese)

8 郑尊清, 尧命发, 汪洋, 等. 二甲醚均质压燃燃烧过程的试验研究[J] . 燃烧科学与技术, 2003, 9(6): 561~565. Zheng Zunqing, Yao Mingfa, Wang Yang, et al. Experimental study of HCCI combustion process fueled with DME[J] . Journal of Combustion Science and Technology, 2003, 9(6): 561~565. (in Chinese)