江苏大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF JIANGSU UNIVERSITY(Natural Science Edition)
2017 年 9 月 Sept. 2017
第 38 卷 第 5 期 Vol. 38 No. 5
doi: 10.3969/j.issn.1671 - 7775.2017.05.001

智能车辆自动泊车路径跟踪的非光滑控制策略

江浩斌[1,2], 李臣旭[1], 马世典[2], 丁世宏[3], 张 超[4]
(1. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏大学 汽车工程研究院, 江苏 镇江 212013; 3. 江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013; 4. 众泰汽车工程研究院, 浙江 杭州 310000)

摘要: 针对车辆的非线性非完整约束特性导致的自动泊车路径跟踪实时控制精度不高,致使库内调整次数增加或车辆最终停放位姿不理想等问题,提出一种基于非光滑控制的自动泊车路径跟踪控制策略. 通过对车辆动力学跟踪误差模型的降阶转换,推导了 2 阶、3 阶子系统的级联系统有限时间跟踪控制方程. 基于此降阶控制方程,以车辆动力学模型中的方向盘转角和车速作为输入,设计具有全局渐近稳定特性的路径跟踪控制器,并进行了仿真分析. 结果表明:与传统方法相比基于非光滑控制的路径跟踪控制方法达到了有限时间内全局精确跟踪参考泊车路径的目的,具有强抗扰动性和快速收敛性.

关键词: 自动泊车; 路径跟踪; 非光滑控制; 动力学跟踪误差模型; 级联系统
中图分类号: U463.6 **文献标志码**: A **文章编号**: 1671 - 7775(2017)05 - 0497 - 06
引文格式: 江浩斌,李臣旭,马世典,等. 智能车辆自动泊车路径跟踪的非光滑控制策略[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2017,38(5):497 - 502.

Path tracking control of automatic parking for intelligent vehicle based on non-smooth control strategy

JIANG Haobin[1,2], *LI Chenxu*[1], *MA Shidian*[2], *DING Shihong*[3], *ZHANG Chao*[4]
(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. Automotive Engineering Research Institute, Jiangsu University, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 4. Zotye Automotive Engineering R & D, Hangzhou, Zhejiang 310000, China)

Abstract: The low path tracking precision of automatic parking in real-time control was caused by the nonlinear non holonomic constraint characteristics of vehicle, and the number of adjustments in garage was increased with bad vehicle pose. To solve the problems, a control strategy for automatic parking tracking was proposed based on non-smooth control. The second-order and the third-order limited time tracking equations of subsystem cascade system were deduced by the reduced-order conversion of dynamics tracking error model of vehicle. The path tracking controller with global asymptotic stability characteristics was designed based on the reduced-order equation, and the steering wheel angle of vehicle dynamics model and the vehicle speed were served as inputs to conduct simulation. The results show that compared to traditional approaches, the path tracking control method based on non-smooth control can achieve global exact tracking reference parking path in limited time with strong anti-disturbance and rapid convergence ability.

Key words: automatic parking; path tracking; non-smooth control; dynamics tracking error model; cascade system

收稿日期: 2016 - 07 - 28
基金项目: 江苏省产学研前瞻性联合创新项目(BY2012173); 交通部信息化重点项目(2013 - 364 - 863 - 900); 江苏省研究创新计划项目(KYLX_1057)
作者简介: 江浩斌(1969—),男,江苏启东人,教授,博士生导师(jianghb@ujs.edu.cn),主要从事车辆动态性能分析控制与系统设计、电控液压助力转向设计和性能研究.
李臣旭(1989—),男,山东潍坊人,硕士研究生(lichenxu@ujs.edu.cn),主要从事汽车电子控制研究.

智能车辆关键技术的研究已成为国内外科研机构关注的焦点[1]. 自动泊车作为智能车辆关键技术的研究热点之一,其路径跟踪控制策略是实现智能车辆自动泊车的一项关键技术. 如何实现自动泊车过程中智能车辆对预设路径的精确跟踪,是提高智能车辆自动泊车精度的难点之一[2].

最初的泊车系统是基于语音提示的半自动泊车系统,系统通过语音对驾驶员进行提示,能在一定程度上提高泊车效率,但泊车效果受限于驾驶员的反应和操纵速度. 研究人员针对该问题,设计了基于路径规划的自动泊车系统,泊车过程中系统接管方向盘,驾驶员仅需要控制车速并根据提示更换挡位即可完成泊车,该泊车系统解决了泊车效果受限于驾驶员的反应和操纵速度的困扰,但系统无法对预设泊车路径实现精确跟踪,影响泊车效果的稳定性. 为了提高泊车路径跟踪的精确性,专家学者提出了基于路径跟踪的自动泊车系统,并设计了多种控制算法. 文献[3]基于制导的路径跟踪控制理论提出了一种能保证受控闭环系统全局一致渐近稳定的跟踪控制律;文献[4-6]分别基于模糊控制算法设计了不同路径跟踪控制器并对车式移动机器人进行了控制试验;文献[7]基于云模型不确定推理理论对预测对象进行跟踪预测并设计了控制原型. 虽然上述方法能够解决路径跟踪问题,但都是基于车辆的运动学模型展开研究,即忽略车辆的系统动态,不能真实反映车辆的运动状况. 非光滑控制技术是控制系统中一个非常有效的控制技术,很多不能被光滑镇定的本质非线性系统都可以被非光滑镇定. 与传统的渐近稳定性系统相比,非光滑控制系统的优点之一是使得系统具有更强的抗扰动性能. 由于非光滑控制器具有快速收敛性、强抗扰动性和强鲁棒性等优点,因此近年来非光滑控制引起了很多学者的关注. 目前该控制方法已应用于永磁同步电动机调速控制、空间飞行器姿态控制和多智能体控制等领域[8-9].

为了提高泊车路径跟踪效果,笔者采用非光滑控制理论,基于车辆动力学模型研究泊车路径跟踪控制问题. 考虑车辆动力学模型的特性,基于非光滑控制理论设计具有全局渐近稳定性的路径跟踪控制器,使智能车辆自动泊车时能在有限时间内全局跟踪参考路径,提高控制方法响应速度.

1 车辆动力学模型及跟踪误差模型

对于笛卡尔坐标系下的车辆,以车辆后轴中点为研究对象,系统简化的车辆泊车过程动力学模型如图1所示.

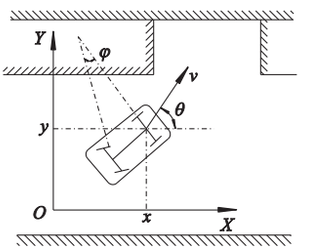


图1 泊车过程的简化汽车模型

模型可由非线性微分方程来描述:

$$\begin{cases}\dot{x}=v\cos\theta\cos\varphi,\\ \dot{y}=v\sin\theta\cos\varphi,\\ \dot{\theta}=\omega,\\ \dot{v}=u_1,\\ \dot{\omega}=u_2,\end{cases}\tag{1}$$

式中:(x,y)为车辆后轴中点坐标;θ为汽车行驶方位角,即行驶方向与x轴夹角;φ为阿克曼转角,取顺时针方向为正;v为车辆后轴中点的线速度;ω为车辆后轴中点的角速度,在动力学模型中v和ω用于控制输入;u_1和u_2为控制律,可看成车辆的力矩或广义力.

研究重点是车辆自动泊车入库的路径跟踪问题,即寻找控制律u_1,u_2使车辆在有限时间内跟踪由位姿矢量$(x_r,y_r,\theta_r)^{\mathrm{T}}$和输入信号$v_r,\omega_r$描述的参考模型. 参考模型的微分方程描述如下:

$$\begin{cases}\dot{x}_r=v_r\cos\theta_r,\\ \dot{y}_r=v_r\sin\theta_r,\\ \dot{\theta}_r=\omega_r.\end{cases}\tag{2}$$

位姿误差坐标表示如图2所示.

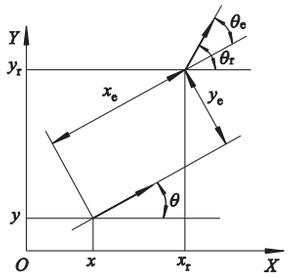


图2 位姿误差坐标表示

定义跟踪误差为

$$\begin{bmatrix}x_e\\ y_e\\ \theta_e\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\theta & \sin\theta & 0\\ -\sin\theta & \cos\theta & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_r-x\\ y_r-y\\ \theta_r-\theta\end{bmatrix}.\tag{3}$$

由此可导出车辆动力学跟踪误差模型:

$$\begin{cases}\dot{x}_e=\omega y_e-v+v_r\cos\theta_e,\\ \dot{y}_e=-\omega x_e+v_r\sin\theta_e,\\ \dot{\theta}_e=\omega_r-\omega,\\ \dot{v}=u_1,\\ \dot{\omega}=u_2.\end{cases}\tag{4}$$

基于上述分析，将车辆动力学模型的路径跟踪定义为寻找有界输入 v_r 和 ω_r，使得对任意初始误差，系统(3)在该控制输入作用下$(x_e,y_e,\theta_e)^{\mathrm{T}}$有界且$\lim\limits_{t\to\infty}\|(x_e,y_e,\theta_e)^{\mathrm{T}}\|=0$.

2　有限时间路径跟踪控制器的设计

将误差跟踪模型(4)转换为含有 2 个低阶子系统的级联系统，其中 3 阶子系统状态量为 x_e，y_e 和 v，2 阶子系统状态量为 θ_e 和 ω. 分别对 2 个子系统设计有限时间跟踪控制器，然后通过分析级联系统的全局稳定性证明该闭环系统的全局渐近稳定性[10].

记 $\omega=\omega-\omega_r+\omega_r$，则式(4)可写为

$$\begin{cases}\dot{x}_e=\omega_r y_e-v+v_r-\bar{\omega}y_e+v_r(\cos\theta_e-1),\\ \dot{y}_e=-\omega x_e+\bar{\omega}x_e+v_r\sin\theta_e,\\ \dot{v}=u_1,\\ \dot{\theta}_e=\bar{\omega},\\ \dot{\bar{\omega}}=\bar{u}_2,\end{cases}\tag{5}$$

式中：$\bar{\omega}=\omega_r-\omega$；$\bar{u}_2=\dot{\omega}_r-u_2$.

定义状态变换：

$$\boldsymbol{X}_1=\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\x_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}y_e\\-\omega_r x_e\\-\omega_r^2 y_e+\omega_r(v-v_r)+\dfrac{\dot{\omega}_r x_2}{\omega_r}\end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{X}_2=\begin{bmatrix}x_4\\x_5\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\theta_e\\\bar{\omega}\end{bmatrix}.$$

则车辆动力学跟踪误差模型可以转换为级联系统：

$$\dot{\boldsymbol{X}}_1=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{X}_1,\bar{u}_1)+\boldsymbol{g}(\boldsymbol{X}_1,\boldsymbol{X}_2),\tag{6}$$

$$\dot{\boldsymbol{X}}_2=\begin{bmatrix}x_5\\\bar{u}_2\end{bmatrix},\tag{7}$$

式中：

$$\bar{u}_1=-\omega_r\dot{\omega}_r x_1+\left(\frac{\ddot{\omega}_r}{\omega_r}-\omega_r^2-2\frac{\dot{\omega}_r^2}{\omega_r^2}\right)x_2+2\frac{\dot{\omega}_r x_3}{\omega_r}+\omega_r u_1-\omega_r\dot{v}_r;$$

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{X}_1,\bar{u}_1)=\begin{bmatrix}x_2\\x_3\\\bar{u}_1\end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{X}_1,\boldsymbol{X}_2)=\begin{bmatrix}-\dfrac{x_2x_5}{\omega_r}+v_r\sin x_4\\x_1x_5\omega_r-\omega_r v_r(\cos x_4-1)\\x_2x_5\omega_r-\omega_r^2 v_r\sin x_4+\dot{\omega}_r x_1x_5-\dot{\omega}_r v_r(\cos x_4-1)\end{bmatrix}.$$

2.1　2 阶子系统有限时间跟踪控制器设计

2 阶积分系统为

$$\begin{cases}\dot{x}_1=x_2,\\ \dot{x}_2=u.\end{cases}\tag{8}$$

根据以下引理对式(8)设计有限时间跟踪控制器.

引理 1[11]　控制律为

$$u=-k_1\mathrm{sgn}^{\alpha_1}x_1-k_2\mathrm{sgn}^{\alpha_2}x_2,\tag{9}$$

式中：$k_1,k_2>0$；$0<\alpha_2<1$；$\alpha_1=\dfrac{\alpha_2}{2-\alpha_2}$.

式(9)可在有限时间内镇定上述 2 阶积分系统. 由引理 1 可得系统(7)能被如下控制器在有限时间内镇定：

$$u_2=\dot{\omega}_r+l_4\mathrm{sgn}^{\alpha_1}x_4+l_5\mathrm{sgn}^{\alpha_2}x_5,\tag{10}$$

式中：$\alpha_2=\dfrac{1}{2}$；$\alpha_1=\dfrac{\alpha_2}{2-\alpha_2}=\dfrac{1}{3}$；$l_4=10$；$l_5=8$.

2.2　3 阶子系统有限时间跟踪控制器设计

3 阶积分系统为

$$\begin{cases}\dot{x}_1=x_2,\\ \dot{x}_2=x_3,\\ \dot{x}_3=\bar{u}_1.\end{cases}\tag{11}$$

利用下面给出的引理，对上述 3 阶积分系统设计有限时间跟踪控制器.

引理 2[12]　有函数 $W_k(x_1,x_2,\cdots,x_k)=\int_{x_k^*}^{x_k}(s^{\frac{1}{q_k}}-x_k^{*\frac{1}{q_k}})^{2-q_k}\mathrm{d}s$ 是连续的，而且有

$$\frac{\partial W_k}{\partial x_k}=(x^{\frac{1}{q_k}}-x_k^{*\frac{1}{q_k}})^{2-q_k},\tag{12}$$

$$\frac{\partial W_k}{\partial x_l}=-(2-q_k)\frac{\partial x_k^{*\frac{1}{q_k}}}{\partial x_l}\int_{x_k^*}^{x_k}(s^{\frac{1}{q_k}}-x_k^{*\frac{1}{q_k}})^{1-q_k}\mathrm{d}s,\tag{13}$$

式中 $l=1,2,\cdots,k-1$.

由引理 2 可推导出上述 3 阶积分系统能被如下控制器在有限时间内镇定：

$$\bar{u}_1=-l_3[x_3^{\frac{1}{2q-1}}+l_2^{\frac{1}{2q-1}}(x_2^{\frac{1}{q}}+l_1^{\frac{1}{q}}x_1)]^{3q-2},\tag{14}$$

式中：$q=0.85$；$l_1=0.7$；$l_2=8.6$；$l_3=200$.

由此可得，系统(6)能被如下控制器在有限时间内镇定：

$$u_1 = -\frac{200}{\omega_r}[x_3^{\frac{10}{7}} + 8.6^{\frac{10}{7}}(x_2^{\frac{20}{17}} + 0.7^{\frac{20}{17}}x_1)]^{\frac{11}{20}} + \dot{\omega}_r x_1 + \left(\omega_r - \frac{\ddot{\omega}_r}{\omega_r^2} + 2\frac{\dot{\omega}_r^2}{\omega_r^3}\right)x_2 - 2\frac{\dot{\omega}_r}{\omega_r^2}x_3 + \dot{v}_r. \quad (15)$$

2.3 全局稳定性分析

若动力学跟踪误差模型(4)中的 v_r 和 ω_r 满足如下假设条件：

假设1 $\omega_r, \dot{\omega}_r, \ddot{\omega}_r$ 有界，且对任意 $t \geqslant t_0 \geqslant 0$ 有 $0 < \omega_{rmin} \leqslant |\omega_r(t)| \leqslant \omega_{rmax}$，$|\dot{\omega}_r(t)| < \omega_{1max}$ 以及 $|\ddot{\omega}_r(t)| < \omega_{2max}$.

假设2 v_r 和 $\dot{v}_r$ 有界，并且对任意 $t \geqslant t_0 \geqslant 0$ 有 $|v_r(t)| \leqslant v_{rmax}$ 和 $|\dot{v}_r(t)| < v_{1max}$.

则如下控制律 u_1, u_2 可使系统(4)在有限时间内全局渐近稳定，即系统(1)能在有限时间内全局跟踪参考路径(2).

$$u_1 = -\frac{200}{\omega_r}[x_3^{\frac{10}{7}} + 8.6^{\frac{10}{7}}(x_2^{\frac{20}{17}} + 0.7^{\frac{20}{17}}x_1)]^{\frac{11}{20}} + \dot{\omega}_r x_1 + \left(\omega_r - \frac{\ddot{\omega}_r}{\omega_r^2} + 2\frac{\dot{\omega}_r^2}{\omega_r^3}\right)x_2 - 2\frac{\dot{\omega}_r}{\omega_r^2}x_3 + \dot{v}_r,$$

$$u_2 = \dot{\omega}_r + 10\mathrm{sgn}^{\frac{1}{3}}x_4 + 8\mathrm{sgn}^{\frac{1}{2}}x_5.$$

3 系统仿真验证

就上述控制律，在 Matlab/Simulink 仿真平台中搭建泊车路径跟踪控制器模型进行仿真研究，如图3所示.

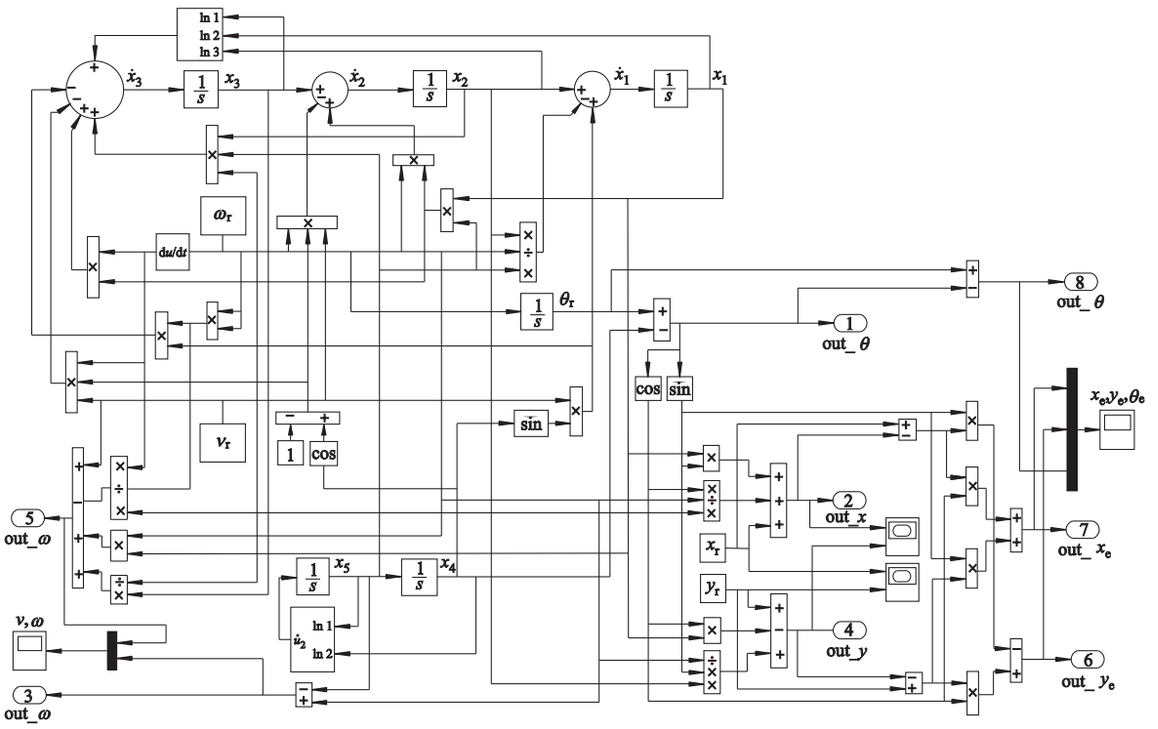


图3 非光滑控制算法框图

为了验证跟踪误差收敛的全局特性，针对3种不同的参考路径和初始条件分别进行了路径跟踪仿真试验，仿真结果验证了设计的控制器的有效性. 仿真试验的参考线速度和角速度给定如下：

$$v_r = 1.6 - \frac{1.5t}{t+10}, \quad (16)$$

$$\omega_r = 1 + \frac{1.2t}{t+10}. \quad (17)$$

3.1 直线路径

指定直线路径：

$$y = x,\ x \in (0,8).$$

仿真中初始条件：

$$[x_1(0), x_2(0), x_3(0), x_4(0), x_5(0)] = [0.40, -0.30, -1.50, -0.40, 0.50];$$

$$[x_r(0), y_r(0), \theta_r(0)] = [0, 0, -1].$$

直线路径跟踪仿真结果如图4所示，直线路径跟踪时，由于转角变化为0，所以从跟踪起点处就开始快速收敛，2.5 s 后逐渐达到稳定，如图4c所示，虽有较小超调，但能迅速稳定，使跟踪误差逐渐趋近于0.

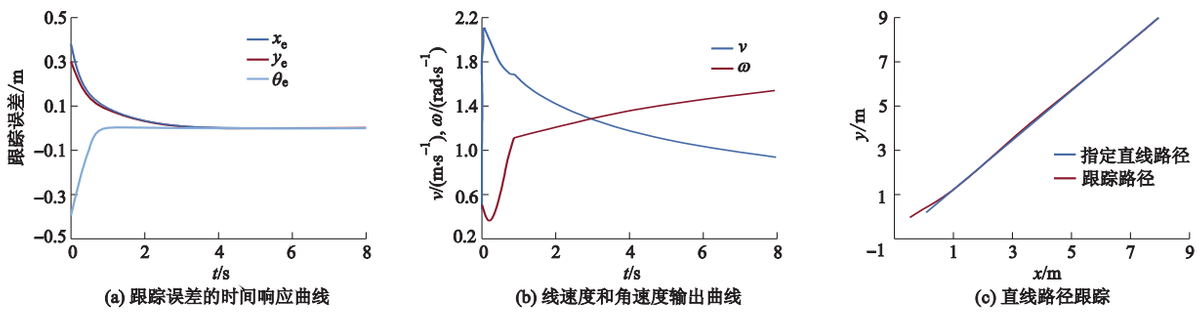


图 4　直线路径跟踪仿真结果

3.2　圆形路径

指定圆形路径：

$$x^2+(y-2)^2=4,\quad x\in(-2.5,2.5).$$

仿真中初始条件：

$$[x_1(0),x_2(0),x_3(0),x_4(0),x_5(0)]=[0.50,-0.30,-1.50,-0.50,0.25],$$

$$[x_r(0),y_r(0),\theta_r(0)]=[0,0,-1].$$

圆形路径跟踪仿真结果如图 5 所示.

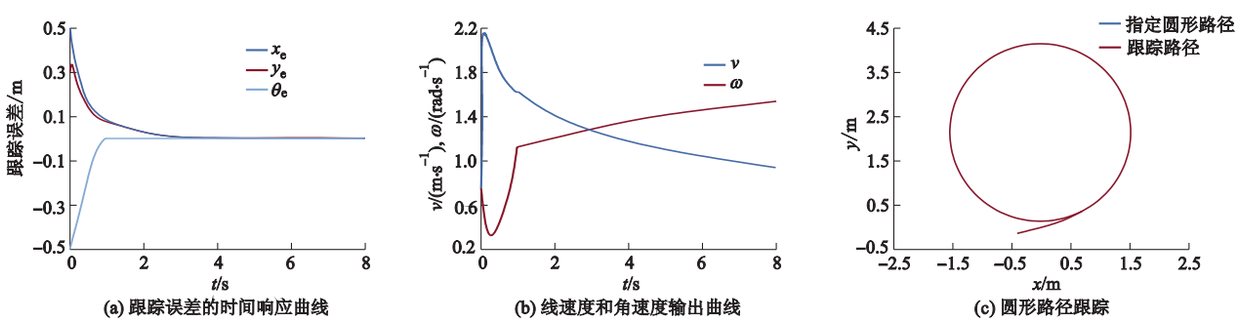


图 5　圆形路径跟踪仿真结果

从图 5 可以看出：圆形路径跟踪时，虽然转角变化率较大，但跟踪控制器能实现快速收敛，将跟踪误差控制在较小范围内. 由图 5c 可以看出：车辆行驶 1.5 m 后首次到达预设位置，之后跟踪误差逐渐趋近于 0. 结果表明：设计的跟踪控制器具有较快的误差收敛速度，可将跟踪误差控制在很小范围内.

3.3　泊车路径

设置车辆自动泊车的起始位置，采用几何方法规划出理想泊车路径，通过对分段曲线进行拟合生成自动泊车路径. 选取仿真试验中泊车起始位置，使用设计的路径跟踪控制器对理想泊车路径进行跟踪.

仿真中初始条件：

$$[x_1(0),x_2(0),x_3(0),x_4(0),x_5(0)]=[0.25,-0.15,-1.50,-0.50,0.50];$$

$$[x_r(0),y_r(0),\theta_r(0)]=[0,0,-1].$$

泊车路径跟踪仿真结果如图 6 所示.

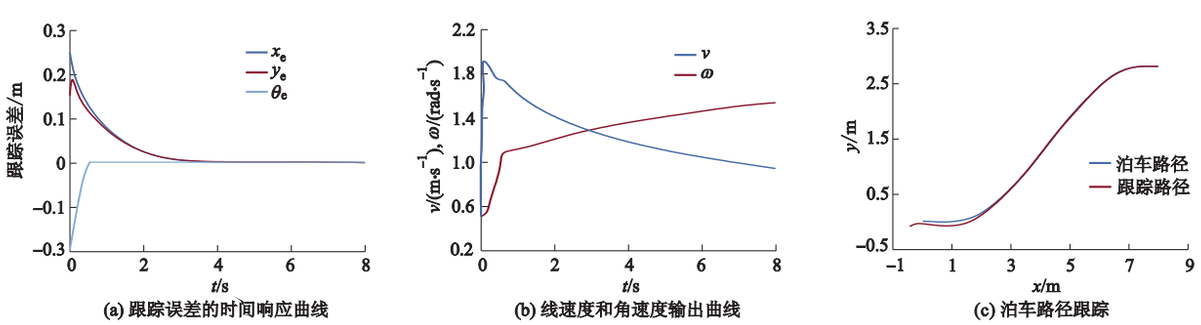


图 6　泊车路径跟踪仿真结果

由图 6 可以看出：由于泊车路径跟踪过程中的转角变化较为平缓，从跟踪起点处就开始快速收敛，跟踪误差在 3 s 之后开始稳定，并在车辆驶过 2.5 m 后逐渐趋近于 0. 结果表明：设计的路径跟踪控制器具有良好跟踪效果，收敛速度快，跟踪误差小，可在有限时间内精确跟踪参考泊车路径.

4 结 论

1)针对自动泊车过程中路径跟踪这一典型控制任务,应用非光滑控制理论设计了一种具有全局渐近稳定性的路径跟踪控制器,使智能车辆在自动泊车入库时能在有限时间内全局跟踪参考路径.

2)通过仿真试验验证了设计的控制器对泊车路径的跟踪效果.结果表明:该控制器响应速度较快,能对泊车路径实现稳定、精确跟踪,具有良好的控制品质.

参考文献(References)

[1] REN D B, ZHANG J Y, ZHANG J M, et al. Trajectory planning and yaw rate tracking control for lane changing of intelligent vehicle on curved road[J]. Science China (Technological Sciences),2011,54(3):630 - 642.

[2] VOROBIEVA H, GLASER S, MINOIU-ENACHE N, et al. Automatic parallel parking in tiny spots: path planning and control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015,16(1):396 - 410.

[3] 郑泽伟,霍伟,诸兵. 非完整移动机器人全局路径跟踪控制[J]. 控制理论与应用,2012,29(6):741 - 746.
ZHENG Z W, HUO W, ZHU B. Global path-following control for nonholonomic mobile robots[J]. Control Theory & Applications, 2012,29(6):741 - 746. (in Chinese)

[4] OUADAH N, OURAK L, BOUDJEMA F. Car-like mobile robot oriented positioning by fuzzy controllers[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2008,5(3):249 - 256.

[5] 曹政才,赵应涛,付宜利. 车式移动机器人轨迹跟踪控制方法[J]. 电子学报,2012,40(4):632 - 635.
CAO Z C, ZHAO Y T, FU Y L. Trajectory tracking control approach of a car-like mobile robot[J]. Acta Electronica Sinica, 2012,40(4):632 - 635. (in Chinese)

[6] 李逃昌,胡静涛,高雷,等. 基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法[J]. 农业机械学报,2013,44(1):205 - 210.
LI T C, HU J T, GAO L, et al. Agricultural machine path tracking method based on fuzzy adaptive pure pursuit model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(1):205 - 210. (in Chinese)

[7] JIANG H B, WU D, MA S D. Study on tracking control of parking path with cloud model[C]//3rd International Conference on Mechanical, Information and Industrial Engineering,2014:354 - 361.

[8] JIFFRI S, MOTTERSHEAD J E. Nonlinear control of an aeroelastic system with a non-smooth structural nonlinearity[J]. Vibration Engineering and Technology of Machinery,2015,23:317 - 328.

[9] 李世华,丁世宏,都海波,等. 非光滑控制理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2013.

[10] MENG G Z, MA K M, ZHANG J W. Global finite-time stabilization design for a class of high-order uncertain nonlinear systems[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2012,19(3):77 - 80.

[11] HONG Y G, WANG J K. Non-smooth finite-time stabilization for a class of nonlinear systems[J]. Science in China:Series F Information Sciences,2006,49(1):80 - 89.

[12] HUANG X Q, LIN W, YANG B. Global finite-time stabilization of a class of uncertain nonlinear systems[J]. Automatica,2005,41(5):881 - 888.

(责任编辑 贾国方)