

文章编号:1001-7372(2015)09-0106-09

自动泊车系统路径跟踪控制策略研究

郭孔辉^{1,2}, 李红¹, 宋晓琳¹, 黄江¹

(1. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082;

2. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了降低泊车系统对驾驶人车速控制要求, 针对泊车过程中驾驶人车速控制失误致使车辆偏离泊车路径最终导致泊车失败的问题, 提出了结合定点跟踪的非时间参考的路径跟踪控制策略 (Non-Time Based Path Tracking combined with Point Tracking, NTBPTcwPT)。设计了定点跟踪控制律, 建立了 NTBPTcwPT 控制模型, 并进行了泊车路径跟踪仿真。结果表明: 基于 NTBPTcwPT 的泊车控制策略降低了控制器对驾驶人速度控制的要求; NTBPTcwPT 策略的位姿调整功能提高了泊车成功率; 基于 NTBPTcwPT 策略的控制器可实现车辆规范停放。

关键词: 汽车工程; 泊车控制策略; 路径跟踪; 定点跟踪; 自动泊车系统

中图分类号: U471.15 **文献标志码:** A

Study on Path Tracking Control Strategy of Automatic Parking System

GUO Kong-hui^{1,2}, LI Hong¹, SONG Xiao-lin¹, HUANG Jiang¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, Jilin, China)

Abstract: In order to reduce the parking system's requirements on velocity control for drivers, in view of the problem of parking failure caused by the car's departure from the parking path because of the driver's velocity control error during parking process, non-time based path tracking combined with point tracking (NTBPTcwPT) control strategy was proposed. Point tracking control law was designed and NTBPTcwPT control model was built for parking path tracking simulation. The simulation results show that the parking control strategy based on NTBPTcwPT reduces the requirement on velocity control for drivers. Position adjustment function of NTBPTcwPT strategy improves the success rate of parking. The controller based on NTBPTcwPT strategy can park the car in regulation.

Key words: automotive engineering; parking control strategy; path tracking; point tracking; automatic parking system

0 引言

汽车数量不断增加导致城市公路与街道拥挤不堪, 狭小的泊车空间及驾驶人有限的视野范围导致

了泊车困难。泊车交通事故率的不断上升和汽车消费者对车辆使用安全、方便性的强烈要求, 引起了汽车生产商的关注, 也促使了越来越多的科研机构对泊车系统研究与开发。Li 等^[1-3]使用模糊控制

收稿日期: 2014-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51175159); 湖南省研究生科研创新项目(CX 2013B146)

作者简介: 郭孔辉(1935-), 男, 福建福州人, 中国工程院院士, 教授, 博士研究生导师, E-mail: guokonghui@gmail.com。

逻辑建立了自动泊车系统控制器模型。Gorinevsky 等^[4-6]结合模糊控制逻辑与神经网络理论设计了泊车控制器,模拟驾驶人泊车操作,由于模糊控制规则不易建立,神经网络模型结构不易确定,导致泊车控制器建模困难。Jiang 等^[7]将泊车路径简化为2段圆弧,在圆弧路径研究的基础上设计车辆方向盘转角和速度随时间变化函数。Paromtchik 等^[8-9]分别采用正弦函数和梯形函数设计车速和车轮转角随时间变化的规律,2种方法均为开环控制,但未研究车速和车轮转角控制误差对泊车效果的影响。Hsu 等^[10]在圆弧泊车路径的基础上,设计出方向盘转角随着车辆行程的变化律,该方法降低了驾驶人速度控制要求,但该方法为开环控制,当存在方向盘转角控制误差时,不能保证车辆沿目标路径行驶。Müller 等^[11]对泊车系统方向盘转角控制律进行研究,其控制律要求车速不为0,即不允许泊车过程中出现停车现象。Lee 等^[12]设计出了闭环泊车运动控制器,该控制器根据小车路径跟踪偏差对车辆速度和航向角速度进行反馈控制,在四轮电动小车上取得了较好的泊车效果,但该方法对车速控制精度要求较高,不适用于速度由驾驶人控制的汽车自动泊车系统。宋金泽^[13]提出分数阶泊车控制器,由于车辆低速行驶时侧向速度、侧向加速度等行驶状态不易测量,限制了其控制器的应用。

国外少数汽车公司已研发出相关的自动泊车产品,目前仅装配在高档轿车上,中国暂未有自主知识产权的可应用于汽车的自动泊车系统,因此本文对自动泊车系统路径跟踪控制策略进行研究。

由于模糊控制规则不易建立,神经网络结构不易确定,且现有文献^[7-13]中提出的泊车控制方法对车速控制要求较高,不易由驾驶人实现,限制了这些方法在泊车系统中的应用。针对以上方法的不足,为降低泊车系统对驾驶人的车速控制要求,本文提出非时间参考的泊车路径跟踪方法,为提高泊车系统泊车成功率及保证车辆规范停放,提出结合定点跟踪的非时间参考的路径跟踪控制策略。

1 自动泊车系统工作流程

自动泊车系统工作过程如图1所示,工作过程描述如下:①自动泊车系统开启后,通过传感器探测车位,若车位空间满足泊车需求,转②,若车位空间大小不满足要求,则继续行驶;②泊车系统确定泊车初始点及目标位置,规划泊车路径。若泊车路径规划完成,转③;③泊车系统提示驾驶人倒车行驶,车

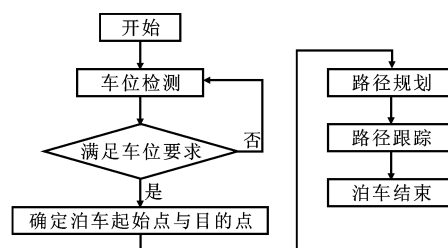


图1 自动平行泊车系统工作流程

Fig. 1 Flow Chart of Automatic Parallel Parking System

辆行驶过程中,泊车系统通过调整方向盘转角使车辆沿目标路径行驶,若车辆到达目的点,转④;④泊车结束。

另外,自动泊车系统还须保证驾驶人可随时接管并控制车辆,以保证泊车过程安全。设泊车路径已成功规划,本文将进行步骤③的工作,即对泊车路径跟踪控制进行研究。

2 车辆运动学模型

泊车过程中,车辆行驶速度较低,因此忽略汽车低速行驶时的车轮侧向滑动,车辆为具有非完整性约束的运动系统,其运动学方程可表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= v \cos(\theta) \\ \dot{y} &= v \sin(\theta) \\ \dot{\theta} &= v/R \\ \dot{x} \sin(\theta) - \dot{y} \cos(\theta) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: x, y 分别为车辆后轴中点在 X 轴和 Y 轴上的坐标; v 为车辆后轴中点行驶速度; θ 为车身方位角; R 为后轴中点处的转弯半径,由Ackerman转向几何原理知 $R = \tan(\varphi)/L$, φ 为前轴等效转角, L 为车辆轴距,如图2所示。

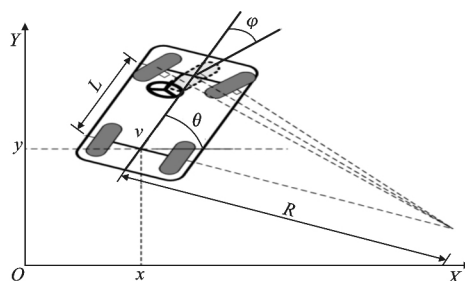


图2 Ackerman转向几何原理

Fig. 2 Ackerman Steering Geometry Principle

3 泊车路径跟踪控制律

3.1 路径跟踪问题

泊车路径跟踪问题可描述为:驾驶人控制车辆行驶速度,自动泊车系统采用合适的方向盘控制律

调整方向盘转角,使车辆沿预定的泊车路径行驶,进入目标车位并到达目的点处,如图 3 所示。由式(1)可知,当车辆轴距确定后,车辆行驶速度和方向盘转角决定了车辆后轴中点的行驶路径。因此,选择后轴中点为研究对象,研究方向盘转角控制策略,控制车辆后轴中点沿预定路径运动。

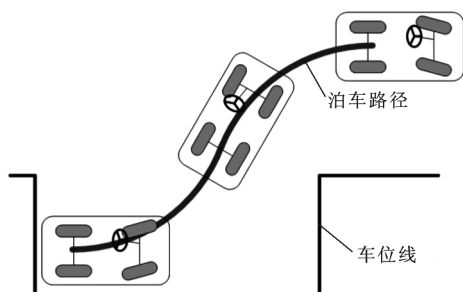


图 3 泊车路径跟踪

Fig. 3 Parking Path Tracking

3.2 泊车路径跟踪控制律

方向盘转角为自动泊车系统可控制输入量,车辆行驶速度由驾驶人控制,为泊车系统非可控制输入量,因此,本文参考文献[14]中采用非时间参考的路径跟踪控制律(Non-time Based Path Tracking, NTBPT)控制车辆跟踪泊车路径。

NTBPT 问题可描述为:对任意给定的几何路径 $f(x_r, y_r, \theta_r) = 0$,选取 1 个随时间单调增加的非时间参考量 s ,根据非时间参考量 s 寻找反馈控制律,对任意给定的小正数 ξ ,存在 s_i ,当 $s > s_i$ 时, $|f(x, y, \theta) - f(x_r, y_r, \theta_r)| < \xi$, $f(x_r, y_r, \theta_r)$ 为目标路径, x_r, y_r, θ_r 均为路径上的目标位姿,其中, x_r 为车辆的 X 轴坐标, y_r 为车辆后轴中点的 X 轴坐标映射到目标路径上的 Y 轴坐标; θ_r 为车辆后轴中点的 X 轴坐标映射到目标路径上的方位角。本文跟随路径为后退式平行泊车路径,且 $\theta \in (-\pi/2, \pi/2)$,因此车辆后轴中点在 X 轴的投影 x 随时间递减,故选择 $-x$ 为参考量,即 $s = -x(t)$, t 为时间。根据图 4 所示跟踪偏差,确定路径跟踪偏差如式(2)所示。

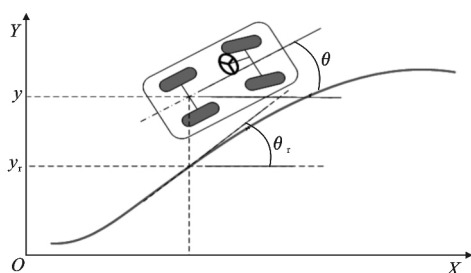


图 4 路径跟踪偏差

Fig. 4 Deviation of Path Tracking

式(2)可表示为

$$\left. \begin{aligned} x_e &= 0 \\ y_e &= y_r - y \\ \theta_e &= \theta_r - \theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: y_e 为车辆在 Y 轴方向上的距离偏差; θ_e 为方位角偏差。

根据非时间参考量 $s = -x(t)$,建立非时间参考的路径跟踪偏差状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy_e}{-dx} &= -\frac{dy_r}{dx} + \frac{dy}{dx} \\ \frac{d\theta_e}{-dx} &= \frac{-\rho_r}{\cos(\theta_r)} + \frac{\tan(\varphi)}{L\cos(\theta)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

即

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(y_r - y)}{-dx} &= -[\tan(\theta_r) - \tan(\theta)] \\ \frac{d(\theta_r - \theta)}{-dx} &= \frac{-\rho_r}{\cos(\theta_r)} + \frac{\tan(\varphi)}{L\cos(\theta)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: ρ_r 为泊车路径曲率。

令 $x_1 = y_r - y$, $x_2 = -[\tan(\theta_r) - \tan(\theta)]$,则以 $-x$ 为非时间参考量的路径跟踪偏差状态方程式(4)可表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{-\rho_r}{\cos(\theta_r)^3} + \frac{\tan(\varphi)}{L[\cos(\theta)]^3} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\varphi = \arctan[L(\cos(\theta))^3(\frac{\rho_r}{\cos(\theta_r)^3} - k_1(y_r - y) + k_2(\tan(\theta_r) - \tan(\theta)))] \quad (6)$$

取前轴等效转角控制律如式(6)所示,将式(5)转化为式(7)。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -k_1 x_1 - k_2 x_2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: k_1, k_2 分别为车辆位置偏差反馈系数、方位角偏差反馈系数。

取 $k_1 > 0, k_2 > 0$,由 Lyapunov 第一稳定定理可知,原点为式(7)唯一平衡点,即

$$\left. \begin{aligned} \lim_{x \rightarrow -\infty} [y_r(x) - y(x)] &= 0 \\ \lim_{x \rightarrow -\infty} [\theta_r(x) - \theta(x)] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

由式(2)~(8)可知,随着车辆后轴中点的 X 轴坐标减小,车辆距离偏差和方位角偏差逐渐减小,车辆逐渐靠近目标路径。

3.3 实例仿真及结果分析

Carsim 是一款图形化建模的汽车仿真软件,建模快速、便捷,可扩展性好,可与 Simulink 等软件进行数据交互,因此,采用 Carsim 软件建立车辆模型,

车辆参数如表 1 所示,在 Simulink 中建立路径跟踪控制器模型,如图 5 所示。圆弧-直线曲线结构简单易参数化,常被应用于泊车路径规划,因此,本文对圆弧-直线泊车路径进行跟踪。泊车路径曲线如式(9)所示,根据经验选取式(6)中跟踪偏差反馈系数 $k_1=1,k_2=0.8$,在驾驶人不同车速控制下,路径跟踪结果如图 6~8 所示。

表 1 车辆参数

Tab. 1 Vehicle Parameters

参数	数值
轴距 L/m	2.405
最大方向盘转角 $\phi_{\max}/(^{\circ})$	570
最大方向盘转速 $\Omega_{\max}/[(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}]$	570
转向系角传动比 K	19
最大前轴等效转角 $\varphi_{\max}/(^{\circ})$	30
最大前轴等效转速 $\omega_{\max}/[(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}]$	30

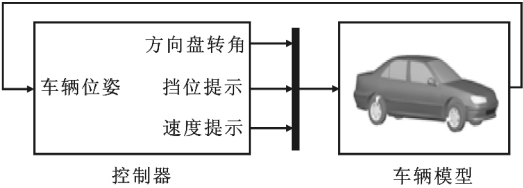


图 5 仿真模型

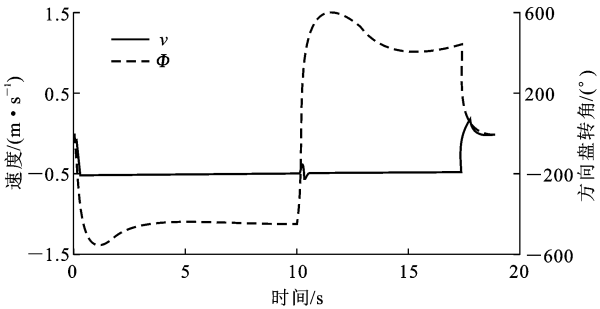
Fig. 5 Simulation Model

$$y=\begin{cases} -5.5+\sqrt{30.25-x^2} & x\in(-3.80,0] \\ 2.44-\sqrt{30.25-(x+7.61)^2} & x\in[-7.61,-3.80] \end{cases} \quad (9)$$

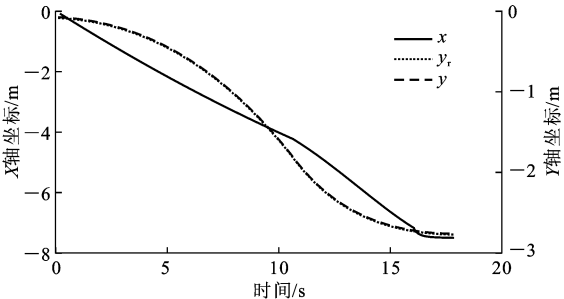
3.3.1 路径跟踪仿真结果

路径跟踪仿真案例①(图 6)中,驾驶人控制车辆以约 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度平稳行驶,控制器根据车辆实际位姿与目标路径位姿偏差,调整方向盘转角,如图 6(a)所示。由图 6(b)可知: $t=0\sim 9.5\text{ s}$ 时,控制器调整方向盘转角使车辆沿路径行驶, $t=9.5\text{ s}$ 时,后轴中点在 X 轴坐标为 3.8 m ,即车辆到达路径两圆弧切点处; $t>9.5\text{ s}$ 时,由于车辆方向盘转速限制,车辆经过圆弧切点后,车辆偏离目标路径,控制器通过调节方向盘转角,使车辆逐渐接近目标路径,并沿目标路径行驶,如图 6(b)、(c)所示。泊车系统完成泊车后,将方向盘回正,如图 6(a)所示。车辆跟踪目标路径行驶结果如图 6(d)所示。

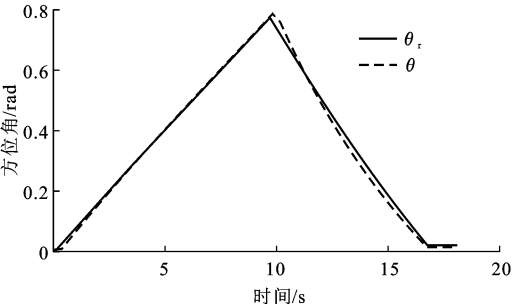
图 7 为案例②路径跟踪仿真结果。由图 7(a)可知:驾驶人控制车辆以约 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度行驶,泊车控制器根据车辆路径跟踪偏差,调整方向盘转角。由图 7(b)、(c)可知: $t=0\sim 3.5\text{ s}$ 时,车辆实际位姿与目标路径位姿基本重合,即车辆沿目标路



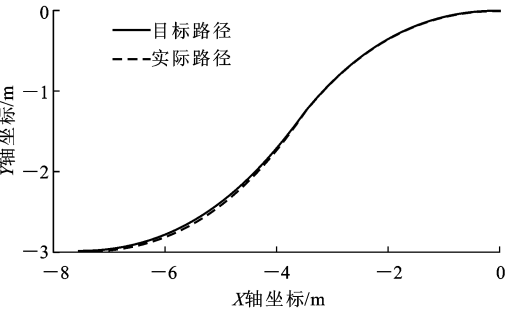
(a) 车速及方向盘转角随时间变化



(b) 车辆位置随时间变化



(c) 车辆方位角随时间变化



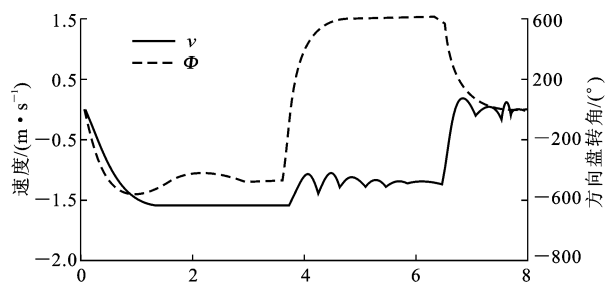
(d) 目标路径与车辆实际路径

图 6 路径跟踪仿真案例①

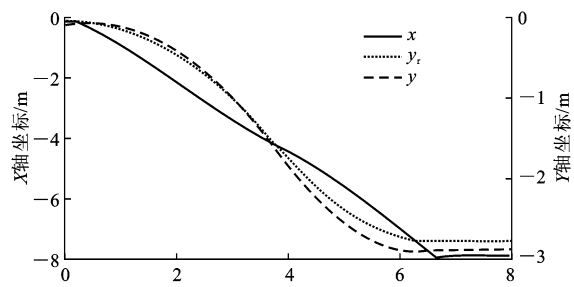
Fig. 6 Simulation Case ① of Path Tracking

径行驶; $t=3.5\text{ s}$ 时,车辆 X 轴坐标 $x=3.8\text{ m}$,车辆到达路径圆弧相切点处;由于车辆方向盘转角转速限制,车辆经过圆弧切点后,车辆偏离目标路径,控制器通过调整方向盘转角,使车辆接近目标路径,但由于车速过高,以及方向盘最大转角限制,车辆未能在短行程内跟踪到目标路径。由图 7(d)可知,车辆偏离目标路径行驶。

路径跟踪仿真案例③结果如图 8 所示。由图 8 可知: $t=0\sim 3\text{ s}$ 时,驾驶人控制车辆以约 1.5



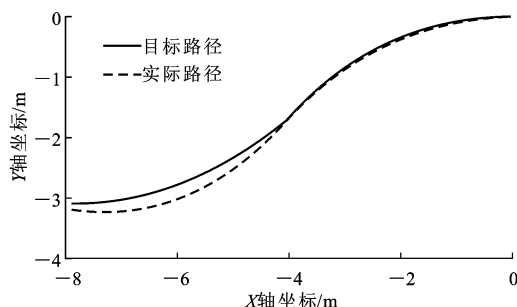
(a) 车速及方向盘转角随时间变化



(b) 车辆位置随时间变化



(c) 车辆方位角随时间变化

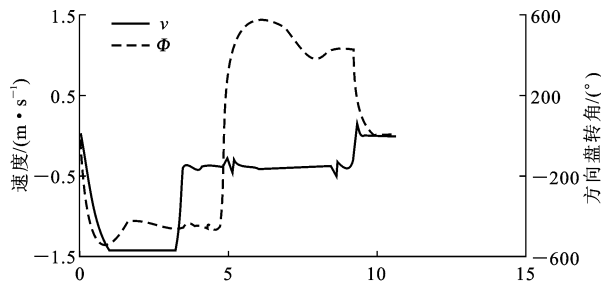


(d) 目标路径与车辆实际路径

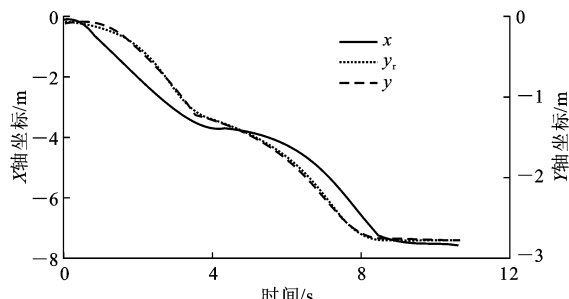
图 7 路径跟踪仿真案例②

Fig. 7 Simulation Case ② of Path Tracking

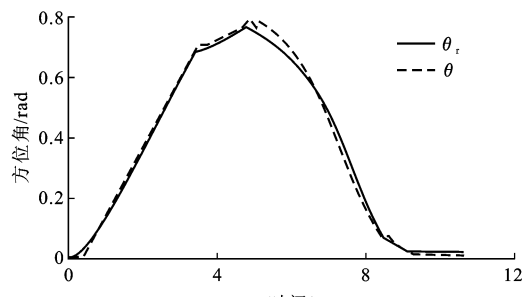
$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度行驶,在合适的方向盘转角控制下,车辆沿目标路径行驶。 $t=3 \text{ s}$ 时,驾驶人根据控制器的提示降低车辆行驶速度,车辆以 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度行驶,并经过路径两圆弧相切点处,车辆沿目标路径行驶,车辆接近路径终点时,驾驶人根据控制器提示,再次降低车辆行驶速度,最终车辆在驾驶人和控制器共同操作下到达路径终点。由图 8(b)、(c) 可知:路径跟踪过程中,车辆实际位姿与目标位姿偏差较小。由图 8(d) 可知车辆实际路径与目标路径基本重合。



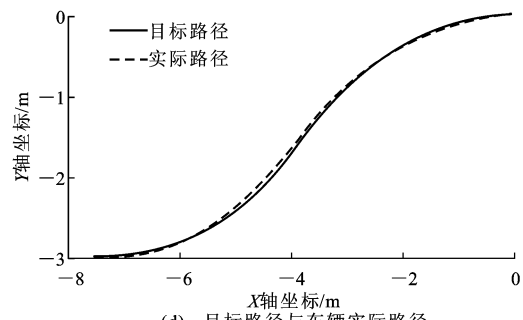
(a) 车速及方向盘转角随时间变化



(b) 车辆位置随时间变化



(c) 车辆方位角随时间变化



(d) 目标路径与车辆实际路径

图 8 路径跟踪仿真案例③

Fig. 8 Simulation Case ③ of Path Tracking

3.3.2 路径跟踪仿真结果分析

由路径跟踪仿真案例①可知,当驾驶人控制车辆低速行驶时,采用式(6)所示方向盘控制律可控制车辆沿目标路径行驶。

对比路径跟踪仿真案例①与②可知,由于转向系统转速限制,车辆经过路径圆弧相切点时,将偏离目标路径,当车速过高时,由于方向盘转角的限制,车辆将偏离目标路径,导致泊车失败。

对比路径跟踪仿真案例②和③可知,若驾驶人根据控制器的提示,在适当位置降低车辆行驶速度,

可实现车辆沿目标路径行驶,并到达路径终点。

4 结合定点跟踪控制的路径跟踪策略

由路径跟踪仿真案例②可知:由于转向系统转向角和角速度限制,车辆在到达路径相切点时需降低速度,若驾驶人未能根据泊车系统提示适当降速,车辆将偏离目标路径导致泊车失败。因此,针对由驾驶人速度操作失误导致的泊车失败现象,提出结合定点跟踪控制的路径跟踪控制策略(Path Tracking Combined with Point Tracking, PTcwPT)。

图9中 Q_1 为目标路径上一点, Q_2 为目标路径在 Q_1 点处切线上一点, Q_3 为目标路径终点, Q_4 为 Q_3 正前方一点。结合图9对PTcwPT控制策略进行描述:控制器控制车辆沿目标路径行驶;当车辆偏离目标路径时,控制器提示驾驶人控制车辆前进行驶,并启动定点跟踪控制,通过控制车辆跟踪定点 Q_2 ,调整车辆位姿;当车辆 X 轴坐标大于 Q_2 点 X 轴坐标,或车辆 Y 轴坐标大于 Q_2 点 Y 轴坐标时,控制器提示驾驶倒车行驶,控制器控制车辆跟踪定点 Q_1 ;若车辆位姿与 Q_1 位姿偏差均小于设定值,控制器采用路径跟踪控制,控制车辆跟踪目标路径,否则控制车辆跟踪 Q_2 ;当车辆到达路径末端时,若车辆位姿与目标路径位姿偏差较大,控制器采用定点跟踪控制,通过控制车辆跟踪 Q_4 点,调整车辆位姿;当车辆 X 轴坐标大于 Q_4 点 X 轴坐标时,控制车辆跟踪定点 Q_3 调整车辆位姿。

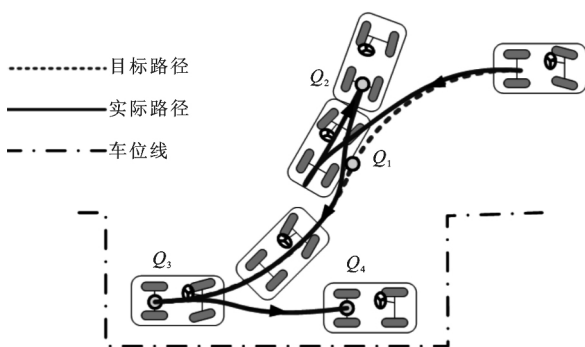


图9 PTcwPT路径跟踪控制

Fig. 9 Path Tracking Control Based on PTcwPT

4.1 非时间参考的定点跟踪控制律

车辆行驶速度由驾驶人控制,车速为泊车系统非可控制量,因此需设计非时间参考的定点跟踪控制律。确定车辆定点跟踪偏差如图10所示,图10中, Q 为车辆跟踪目标点, x_Q, y_Q, θ_Q 为车辆在定点 Q 处的目标位姿, $x_{eQ}, y_{eQ}, \theta_{eQ}$ 为车辆实际位姿与点 Q 处目标位姿的偏差。

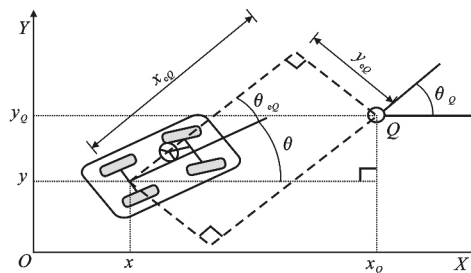


图10 车辆与目标定点偏差

Fig. 10 Deviation Between Car and Target Point

根据图10几何关系,确定定点跟踪偏差为

$$\left. \begin{aligned} x_{eQ} &= (x - x_Q) \cos(\theta_Q) + (y - y_Q) \sin(\theta_Q) \\ y_{eQ} &= (y - y_Q) \cos(\theta_Q) - (x - x_Q) \sin(\theta_Q) \\ \theta_{eQ} &= \theta - \theta_Q \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: x_{eQ}, y_{eQ} 为在目标航向角方向上,车辆与目标点纵向、侧向距离; θ_{eQ} 为车辆实际航向角 θ 与目标航向角 θ_Q 的偏差。

车辆定点跟踪偏差的时间状态函数可表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_{eQ}}{dt} &= v \cos(\theta_{eQ}) \\ \frac{dy_{eQ}}{dt} &= v \sin(\theta_{eQ}) \\ \frac{d\theta_{eQ}}{dt} &= v \tan(\varphi) / L \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由式(11)可知,当 $\theta_{eQ} \in (-\pi/2, \pi/2)$ 时,若目标点在车辆前方,车辆需前进行驶,才能逐渐接近目标点,此时 x_{eQ} 随时间单调递增。因此取 x_{eQ} 为非时间参考量,式(11)可改写为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy_{eQ}}{dx_{eQ}} &= \tan(\theta_{eQ}) \\ \frac{d\theta_{eQ}}{dx_{eQ}} &= \frac{\tan(\varphi)}{L \cos(\theta_{eQ})} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

令 $x_3 = y_{eQ}, x_4 = \tan(\theta - \theta_Q)$,以 x_{eQ} 为非时间参考量,建立车辆定点跟踪偏差状态函数

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \frac{\tan(\varphi)}{L (\cos(\theta_{eQ}))^3} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \varphi &= \arctan \{ L (\cos(\theta_{eQ}))^3 [-k_3 ((x - x_Q) \cdot \sin(\theta_Q) - (y - y_Q) \cos(\theta_Q)) - k_4 \tan(\theta - \theta_Q)] \} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: k_3, k_4 分别为车辆与目标点距离偏差反馈系数和方位角偏差反馈系数。

选择前轴等效转角 φ 的控制律如式(14)所示,则式(13)可表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= -k_3 x_3 - k_4 x_4 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

取 $k_3 > 0, k_4 > 0$, 由 Lyapunove 第一稳定定理可知, 系统[式(15)]平衡点为 $x_3 = 0, x_4 = 0$ 。由此可知, 随着时间的增加, x_{eQ} 逐渐增大, $|x_{eQ}|$ 逐渐减小, y_{eQ}, θ_{eQ} 逐渐趋近于 0, 车辆逐渐接近目标点。

当 $\theta_{eQ} \in (-\pi/2, \pi/2)$ 时, 若目标点在车辆后方, 车辆需后退行驶, 才能逐渐接近目标点, 此时 x_{eQ} 随时间单调递减, 因此, 取 $-x_{eQ}$ 为非时间参考量, 同上方法获得前轴等效转角控制律, 如式(16)所示, 即

$$\varphi = \arctan\{L(\cos(\theta_{eQ}))^3[-k_3((x-x_Q)\sin(\theta_Q) - (y-y_Q)\cos(\theta_Q)) + k_4 \tan(\theta - \theta_Q)]\} \quad (16)$$

联合式(14)、(16), 得前轴等效转角控制律为

$$\varphi = \arctan\{L(\cos(\theta_{eQ}))^3[-k_3((x-x_Q)\sin(\theta_Q) - (y-y_Q)\cos(\theta_Q)) - \text{sign}k_4 \tan(\theta - \theta_Q)]\} \quad (17)$$

$$\text{式中: sign} = \begin{cases} 1 & x_{eQ}|_{t=0} < 0 \\ -1 & x_{eQ}|_{t=0} > 0 \end{cases}$$

4.2 基于 NTBPTcwPT 的泊车控制器

图 11 为基于 NTBPTcwPT 的泊车系统工作流程。

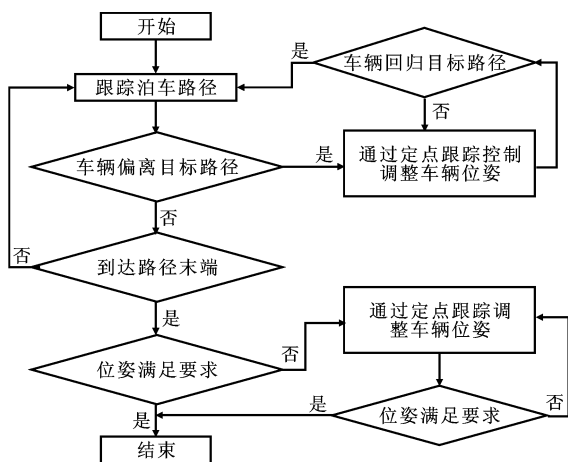


图 11 基于 NTBPTcwPT 的泊车系统工作流程

Fig. 11 Flow Chart of Parking System

Based on NTBPTcwPT

Stateflow 是有限状态机的图形工具, 用于解决复杂的逻辑问题, 用户可以通过图形化工具实现不同工作状态之间的转换, 因此, 根据图 11 所示自动泊车系统工作流程, 采用 Simulink 的 Stateflow 模块建立基于 NTBPTcwPT 的路径跟踪控制器。

4.3 实例仿真与结果分析

为使车辆沿预定路径行驶, 取路径两圆弧相切点为 Q_1, Q_2 为 Q_1 点延长线上一点, Q_3 为路径终点, Q_4 为 Q_3 正前方一点, $Q_1 \sim Q_4$ 点位姿如表 2 所示, 根据经验取 $k_1 = 1, k_2 = 0.8, k_3 = 1, k_4 = 4$ 。

表 2 $Q_1 \sim Q_4$ 位姿

Tab. 2 Pose of $Q_1 \sim Q_4$

定点	X 轴坐标/m	Y 轴坐标/m	方位角/rad
Q_1	-3.798	-1.522	0.765
Q_2	-3.077	-0.830	0.765
Q_3	-7.608	-3.056	0.000
Q_4	-5.108	-3.056	0.000

4.3.1 基于 PTcwPT 的路径跟踪仿真结果

如图 12(a)所示, 驾驶人控制车辆以 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度行驶, 控制器根据车辆路径跟踪偏差, 调整方向盘转角。由图 12(b)、(c)可知: $t = 3.59 \text{ s}$ 时, 车辆 X 轴坐标 $x = 3.8 \text{ m}$, 车辆到达路径圆弧相切点处, 驾驶人未根据泊车系统提示降低车速, 由于方向盘转向角速度限制, 车辆经过圆弧切点后, 车辆偏离目标路径, 由于车速过高, 泊车系统未能在短行程内将车辆调整到目标路径上; $t = 4.58 \text{ s}$ 时, 车辆位姿 $x = -4.803 \text{ m}, y = -2.441 \text{ m}, \theta = 0.588 \text{ rad}$, 目标位姿 $x_r = -4.803 \text{ m}, y_r = -2.287 \text{ m}, \theta_r = 0.535 \text{ rad}$, 泊车系统启动定点跟踪控制, 提示驾驶人停车并低速前进行驶; $t = 5 \sim 9 \text{ s}$ 时, 车辆缓慢前进, 泊车系统通过调整方向盘转角, 控制车辆跟踪定点 Q_2 ; $t = 9.38 \text{ s}$ 时, 车辆位姿 $x = -3.078 \text{ m}, y = -0.858 \text{ m}, \theta = 0.771 \text{ rad}$, 车辆后轴中点 X 轴坐标大于 Q_2 点 X 轴坐标, 泊车系统提示驾驶人停车并倒车行驶, 车辆后退行驶, 泊车系统控制车辆跟踪定点 Q_1 ; $t = 11.6 \text{ s}$ 时, 车辆位姿 $x = -3.801 \text{ m}, y = -1.539 \text{ m}, \theta = 0.761 \text{ rad}$, 车辆与目标点 Q_1 位姿偏差较小, 即车辆回归到目标路径上, 泊车控制器采用路径跟踪控制, 控制车辆沿目标路径到达路径终点。车辆实际路径如图 12(d)所示。由此可知, 当车辆偏离目标路径时, 泊车系统可采用定点跟踪控制律调整车辆位姿, 使车辆回到目标路径上。

如图 13 所示: $t = 0 \sim 18 \text{ s}$ 时, 驾驶人控制车辆低速行驶, 泊车系统控制器通过调整方向盘转角, 使车辆沿目标路径行驶, $t = 18.5 \text{ s}$ 时, 车辆行驶速度增大。由于方向盘转速和车速的共同影响, 车辆到达路径终点时, 车身方位角为 0.065 rad , 即 3.72° , 车辆未与车位平行, 泊车系统采用定点跟踪控制调整车辆位姿, 并提示驾驶人前进行驶。车辆前进行驶的过程中, 泊车系统通过控制车辆跟踪定点 Q_4 调整车辆位姿, 使车辆平行车位停放。 $t = 22.0 \text{ s}$ 时, 车辆 Y 轴坐标 $y = -3.058 \text{ m}$, 方位角 $\theta = 0.002 \text{ rad}$, 泊车系统回正方向盘, 完成泊车操作, 提示驾驶人停车。

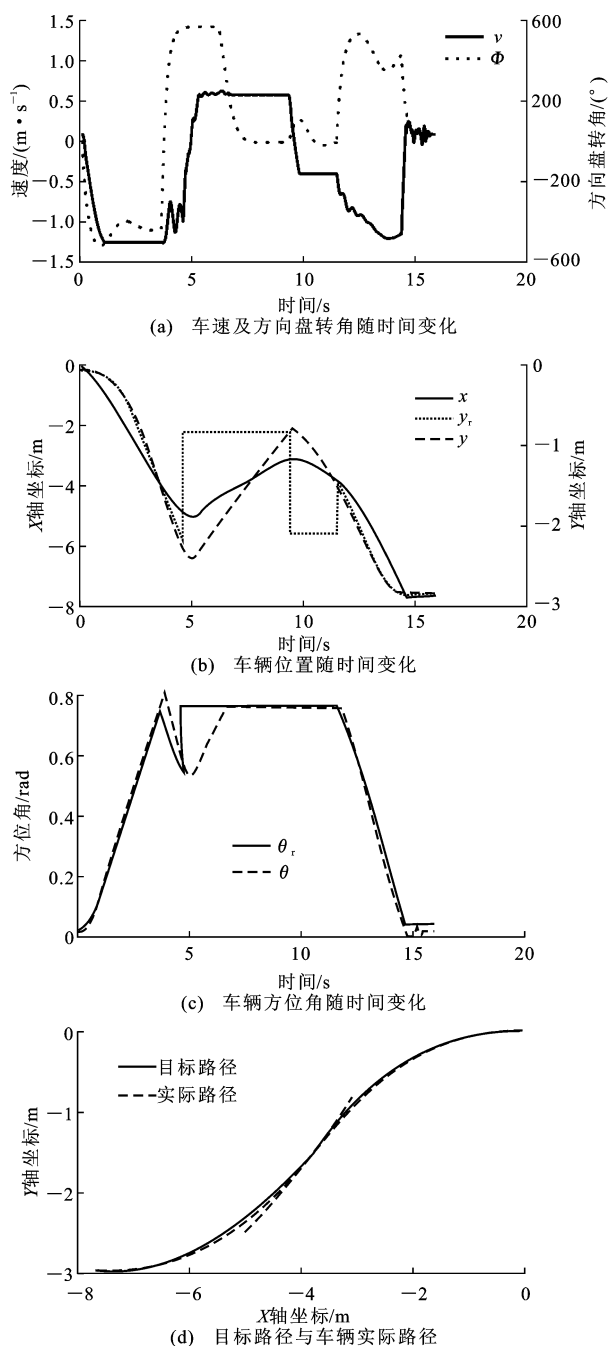


图 12 路径跟踪仿真案例④

Fig. 12 Simulation Case ④ of Path Tracking

4.3.2 路径跟踪仿真结果分析

对比路径跟踪仿真案例②和④可知:受方向盘转角和转速限制,因车辆速度过高,导致车辆偏离目标路径时,基于 NTBPT_{cw}PT 的自动泊车系统可通过定点跟踪控制调整车辆位姿,使车辆重新回到目标路径上,车辆回到路径后,继续控制车辆沿目标路径行驶。泊车系统的位姿调整功能有利于提高泊车系统泊车成功率,可缓解驾驶人泊车过程中的紧张心理。

由路径跟踪仿真案例⑤可知:车辆到达路径终

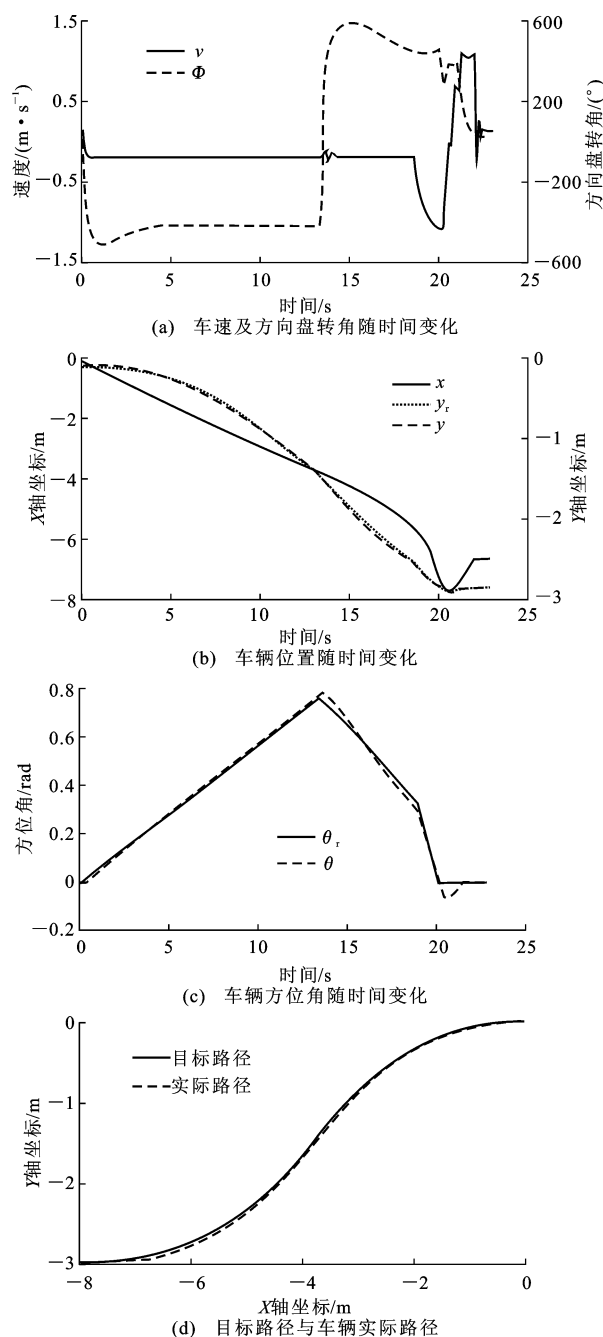


图 13 路径跟踪仿真案例⑤

Fig. 13 Simulation Case ⑤ of Path Tracking

点时,若车辆位姿不满足停放要求,基于 NTBPT_{cw}PT 的泊车控制器可通过定点跟踪控制,调整车辆位姿,使车辆平行车位停放。

5 结 语

(1)提出非时间参考的泊车路径跟踪控制方法,若驾驶人根据泊车系统提示适当控制车速,即可控制车辆沿泊车路径行驶,进入车位,完成泊车。与基于模糊控制理论和神经网络理论的泊车控制方法相比,该方法简便、易实现。与文献[7]~[13]中提

出的方法相比,其降低了泊车系统对驾驶人速度控制的要求,便于驾驶人泊车操作。

(2)针对因驾驶人速度控制失误导致的泊车失败,提出结合定点跟踪的路径跟踪控制策略,即 NTBPT_{cwPT}。当车辆偏离目标路径时,泊车控制器采用定点跟踪控制律调整车辆位姿,使车辆重新回归到目标路径上。与文献[7]~[13]中的泊车控制方法相比,具有位姿调整功能的泊车控制器对驾驶人速度操作失误具有补救功能,有利于提高泊车系统的泊车成功率,并缓解驾驶人紧张心理。提出的泊车路径跟踪策略还可用于跟踪其他形式的泊车路径,如正弦曲线泊车路径、多项式泊车路径、B样条曲线泊车路径等。

(3)提出的定点跟踪控制方法还可应用于车辆进入车位后的位姿调整,使车辆平行车位停放,使车辆停放更加规范,有利于停车场车辆管理和提高停车场空间利用率。

(4)采用 Carsim 与 Simulink 联合仿真的方法对泊车系统控制策略进行了验证,车辆仿真模型与实车存在一定差距,未来工作将在实车上对泊车系统控制策略进行验证,同时将对车位检测方法、车辆定位方法以及人-机交互单元进行研究,以实现具有自主知识产权的自动泊车系统。

参考文献:

References:

- [1] LI T H S, CHANG S J. Autonomous Fuzzy Parking Control of a Car-like Mobile Robot[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Part A, 2003, 33(4): 451-465.
- [2] RYU Y W, OH S Y, KIM S Y. Robust Automatic Parking Without Odometry Using an Evolutionary Fuzzy Logic Controller[J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2008, 6(3): 434-443.
- [3] 姜 辉. 自动平行泊车系统转向控制策略的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
JIANG Hui. Research on Strategies of Automatic Parallel Parking Steering Control[D]. Changchun: Jilin University, 2010.
- [4] GORINEVSKY D, KAPITANOVSKY A, GOLDBERG A. Neural Network Architecture for Trajectory Generation and Control of Automated Car Parking[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1996, 4(1): 50-56.
- [5] DAXWANGER W A, SCHMIDT G. Neural and Fuzzy Approaches to Vision-based Parking Control[J]. Control Engineering Practice, 1996, 4(11): 1607-1614.
- [6] KHOSHNEIJAD M, DEMIRLI K. Autonomous Parallel Parking of a Car-like Mobile Robot by a Neuro-fuzzy Behavior-based Controller[C]//IEEE. Fuzzy Information Processing Society. Washington DC: IEEE, 2005: 814-819.
- [7] JIANG K, SENEVIRATNE L D. A Sensor Guided Autonomous Parking System for Nonholonomic Mobile Robots[C]//IEEE. International Conference on Robotics and Automation. Washington DC: IEEE, 1999: 311-316.
- [8] PAROMTCHIK I E, LAUGIER C. Motion Generation and Control for Parking an Autonomous Vehicle[C]//IEEE. Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington DC: IEEE, 1996: 3117-3122.
- [9] PRADALIER C, VAUSSIÉ S, CORKE P. Path Planning for a Parking Assistance System: Implementation and Experimentation[C]//ARAA. Australian Conference on Robotics and Automation. Sydney: ARAA, 2005: 1-10.
- [10] HSU T, LIU J F, YU P N, et al. Development of an Automatic Parking System for Vehicle[C]//IEEE. Vehicle Power and Propulsion Conference. Washington DC: IEEE, 2008: 1-6.
- [11] MÜLLER B, DEUTSCHER J, GRODDE S. Trajectory Generation and Feedforward Control for Parking a Car[C]//IEEE. International Conference on Control Applications. Washington DC: IEEE, 2006: 163-168.
- [12] LEE K, KIM D, CHUNG W, et al. Car Parking Control Using a Trajectory Tracking Controller[C]//IEEE. International Joint Conference. Washington DC: IEEE, 2006: 2058-2063.
- [13] 宋金泽. 自主泊车系统关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
SONG Jin-ze. Research on the Key Technology for Auto-parking System[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- [14] 王栋耀, 马旭东, 戴先中. 非时间参考的移动机器人路径跟踪控制[J]. 机器人, 2004, 26(3): 198-203.
WANG Dong-yao, MA Xu-dong, DAI Xian-zhong. Non-time Based Path Tracking Control for Mobile Robots[J]. Robot, 2004, 26(3): 198-203.