

doi: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2017.02.003

# 基于预瞄模糊控制的自动泊车算法研究

熊周兵<sup>1</sup> 杨威<sup>2</sup> 丁可<sup>1</sup> 梁锋华<sup>1</sup> 郑玲<sup>2</sup> 黎予生<sup>1</sup>

(1. 重庆长安汽车股份有限公司 汽车研究总院 重庆 401120;

2. 重庆大学 机械传动国家重点实验室 重庆 400044)

**摘 要:** 针对目前自动泊车系统转向不连续问题,提出一种两段式泊车路径规划算法,采用 Sigmoid 函数对路径进行函数拟合,确定泊车路径。建立了横向预瞄模型,对路径追踪误差进行估计,采用模糊控制方法,对拟合后的理想路径进行追踪;搭建了 PreScan 虚拟仿真环境,通过超声波传感器获取车位信息,对提出的基于预瞄模糊控制的自动泊车算法进行了仿真验证。仿真结果表明: Sigmoid 函数对两段式泊车路径的拟合决定系数可达 0.99 以上;采用该预瞄模糊控制泊车算法,汽车能很好地追踪规划的路径,并成功泊入预定车位。

**关 键 词:** 两段式泊车; 函数拟合; 预瞄模糊控制; PreScan

中图分类号: U491.7

文献标识码: A

文章编号: 1674-8425(2017)02-0014-09

## Research on the Auto Parking Algorithm Based on the Preview Fuzzy Control

XIONG Zhou-bing<sup>1</sup>, YANG Wei<sup>2</sup>, DING Ke<sup>1</sup>, LIANG Feng-hua<sup>1</sup>,  
ZHENG Ling<sup>2</sup>, LI Yu-sheng<sup>1</sup>

(1. Chang'an Auto Global R&D Center, Chang'an Automobile Co., Ltd.,  
Chongqing 401120, China; 2. The State Key Laboratory of Mechanical Transmissions,  
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The Sigmoid function was adopted to fit the two section of parking path planning, with the aim to solve the discontinuous problems of automatic parking system. The lateral preview model was established and the path tracking error was estimated. Then the preview fuzzy control algorithm was adopted to track the ideal path. Finally, PreScan virtual simulation environment was established and the information of the parking slots was obtained by ultrasonic sensors. Simulation results demonstrate

收稿日期: 2016-11-28

基金项目: 重庆市自然科学基金重点资助项目(cstc2015jcyjBX0097); 重庆市重点产业共性关键技术创新专项项目(cstc2015zdcy-ztzz30001)

作者简介: 熊周兵,男,博士,主要从事车辆工程研究; 通讯作者: 郑玲,女,教授,博士生导师,主要从事汽车系统动力学与控制、智能材料与结构系统、振动与噪声控制等方面研究, E-mail: zling@cqu.edu.cn。

引用格式: 熊周兵,杨威,丁可,等. 基于预瞄模糊控制的自动泊车算法研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学) 2017(2): 14-22.

**Citation format:** XIONG Zhou-bing, YANG Wei, DING Ke, et al. Research on the Auto Parking Algorithm Based on the Preview Fuzzy Control[J]. Journal of Chongqing University of Technology( Natural Science) 2017(2): 14-22.

that the fit coefficient of determination can be over 0.99 between the Sigmoid function and the two-section parking path. Based on the preview fuzzy control, the car can track the planning path successfully and park into parking spaces.

**Key words:** two-section parking; function fitting; preview fuzzy control; PreScan

随着汽车数量的逐年攀升,城市停车场空间趋于饱和,经验不足的驾驶员很难轻松地将汽车泊入拥挤的泊车位,因泊车造成的事故也屡见不鲜。自动泊车系统为解决泊车困难的问题提供了先进的技术手段。

目前,国内外主要采用两种方法进行自动泊车控制算法的研究<sup>[1]</sup>: ① 路径规划: 借助传感器获取泊车空间几何形状与障碍位置,根据车辆运动学模型,预先规划出一条理想的路径,设计控制算法执行路径跟踪,实现自动泊车; ② 利用经验知识模拟驾驶员操作控制,如采用模糊逻辑、神经网络算法等。但这些算法都过于复杂,不利于泊车实时性要求。Paromtchik 等<sup>[2]</sup>利用回归算法拟合正弦曲线得到理想路径实现路径规划,但该算法需要很大的泊车空间。李红等<sup>[3]</sup>采用多约束优化的方法拟合反正切曲线设计理想路径,但该算法计算效率较低,不利于实际应用。ZHAO、CHANG 等<sup>[4-5]</sup>应用泊车经验知识设计模糊控制器来控制泊车过程,但该算法对汽车初始位置敏感,对泊车空间要求较大。吴冰等<sup>[6]</sup>采用粒子群方法、结合 RBF 神经网络实现自动泊车路径规划,其仿真成功率高,但对初始位置要求较高,计算量大。

自动泊车系统的设计难度在于汽车能在尽可能小的空间内快速决策出泊入过程中的方向盘转角,实现多种空间状态下的自动泊入。考虑到工程适用性与算法鲁棒性,本文采用路径规划的方法寻找理想路径。以此为基础,研究基于预瞄模糊控制的平行泊车控制算法,以实现汽车稳定追踪理想路径,降低泊入过程中的计算积分误差,提高不同环境下的泊车成功率。

## 1 自动泊车路径规划算法

一个完整的自动泊车系统包括 4 个部分: 环境感知、路径规划、路径跟踪、人机交互<sup>[7]</sup>。自动

泊车工作流程如图 1 所示。当驾驶员启动自动泊车系统后,在车辆运动过程中,传感器会自动探测周围空间环境。当有适合尺寸的泊车空间时<sup>[7]</sup>,人机交互系统会提示驾驶员找到车位,系统自动进行路径规划。若可以规划出一条泊入路径则提示驾驶员可以进行泊车,否则驾驶员只能放弃当前泊车位置。之后按照系统提示,驾驶员挂入倒挡,路径跟踪控制开始执行,最终完成泊车。

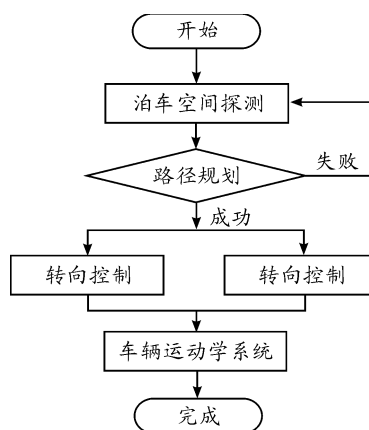


图 1 自动泊车工作流程

Fig. 1 Automatic parking workflow

自动泊车系统的路径规划是根据车载超声波传感器探测到泊车需求方向上的车位空间信息,再利用这些信息规划出一条理想的路径。相比智能算法,路径规划可大大降低计算的复杂程度,并预先确定汽车能否在此泊车位完成自动泊车。

### 1.1 路径规划运动学模型

图 2 为基于阿克曼转向机构的车辆运动学模型<sup>[8]</sup>。

由于正常情况下泊车速度很低(约 $\leq 5$  km/h),故后轮可视为无滑移,即后轮轨迹的  $y$  方向速度为 0,根据图 2 可知车辆后轴中心点坐标:

$$\dot{y}_r \cos \theta - \dot{x}_r \sin \theta = 0 \quad (1)$$

前后轴中心点坐标之间存在如下关系:

$$\begin{aligned} x_r &= x_f - l \cos \theta \\ y_r &= y_f - l \sin \theta \end{aligned} \quad (2)$$

对式(2)进行求导得:

$$\dot{x}_r = \dot{x}_f + \dot{\theta} l \sin \theta \quad (3)$$

$$\dot{y}_r = \dot{y}_f - \dot{\theta} l \cos \theta$$

将式(3)代入式(1)得

$$\dot{x}_f \sin \theta - \dot{y}_f \cos \theta + \dot{\theta} l = 0 \quad (4)$$

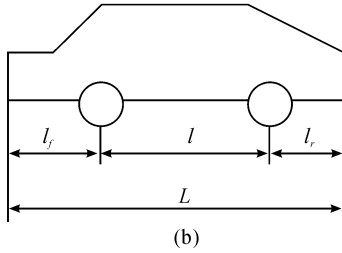
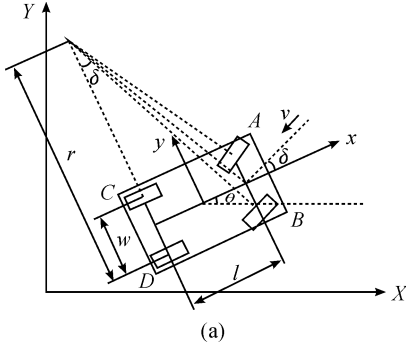


图2 车辆运动学模型

Fig. 2 Vehicle kinematics model

设  $\delta$  为阿克曼转向机构中前轴中心点等效转向角, 则前轴中心点的速度为:

$$\dot{x}_f = v \cos(\theta + \delta) \quad (5)$$

$$\dot{y}_f = v \sin(\theta + \delta)$$

将式(5)代入式(4)得

$$\dot{\theta} = \frac{v \sin \delta}{l} \quad (6)$$

再将式(5)与(6)代入式(3), 可获得后轮中心点速度:

$$\dot{x}_r = v \cos \theta \cos \delta \quad (7)$$

$$\dot{y}_r = v \sin \theta \cos \delta$$

将式(7)对时间积分, 可推导出后轮中心点的运动轨迹:

$$x_r(t) = l \cot \delta \sin\left(\frac{v \sin \delta}{l} t\right) \quad (8)$$

$$y_r(t) = -l \cot \delta \cos\left(\frac{v \sin \delta}{l} t\right) + l \cot \delta$$

$$x_r^2 + (y_r - l \cot \delta)^2 = (l \cot \delta)^2$$

左后轮的运动轨迹为:

$$x_{rl}(t) = \left(l \cot \delta - \frac{w}{2}\right) \sin\left(\frac{v \sin \delta}{l} t\right)$$

$$y_{rl}(t) = -\left(l \cot \delta - \frac{w}{2}\right) \cos\left(\frac{v \sin \delta}{l} t\right) + l \cot \delta \quad (9)$$

$$x_{rl}^2 + (y_{rl} - l \cot \delta)^2 = \left(l \cot \delta - \frac{w}{2}\right)^2$$

右后轮的运动轨迹为:

$$x_{rr}(t) = \left(l \cot \delta + \frac{w}{2}\right) \sin\left(\frac{v \sin \delta}{l} t\right)$$

$$y_{rr}(t) = -\left(l \cot \delta + \frac{w}{2}\right) \cos\left(\frac{v \sin \delta}{l} t\right) + l \cot \delta \quad (10)$$

$$x_{rr}^2 + (y_{rr} - l \cot \delta)^2 = \left(l \cot \delta + \frac{w}{2}\right)^2$$

其中:  $\theta$  为汽车方位角;  $l$  为轴距;  $w$  为轮距。

由式(9)与(10)可以看出: 当汽车低速泊车时, 后轮的运动轨迹与车速无关, 只与汽车的轴距、轮距与转向轮转角有关, 并且运行轨迹是一段圆弧。上述轨迹规划的运动学方程为两段式泊车提供了理论依据。

## 1.2 两段式泊车路径拟合方法

依据汽车低速泊车后轮轨迹为圆弧的特点, 根据泊车空间的尺寸大小确定两段相切圆弧, 汽车后轮可以沿着圆弧运动顺利泊入车位, 这就是两段式泊车。通过控制汽车的最小转弯半径, 两段式泊车不仅能够减少泊车空间, 降低泊车换挡次数, 还能使汽车平行泊入车库内走过的路径最短。两段式泊车几何路径规划如图3所示。

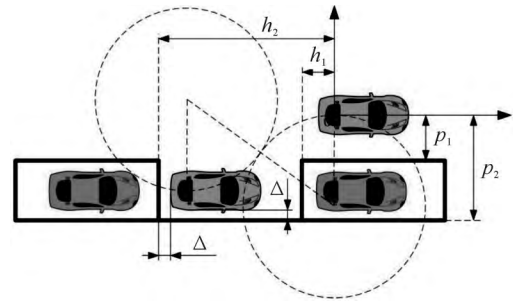


图3 两段式泊车几何路径规划

Fig. 3 Two stage parking geometric path planning

根据阿克曼转向原理, 车辆运行过程中转弯半径与前轮转角之间的关系为

$$r = \frac{l}{\tan \alpha_{\text{out}}} \tan \delta = \frac{l}{r - w/2} \quad (11)$$

其中  $\alpha_{\text{out}}$  为前外轮转角。从图 3 可知: 汽车以最小转弯半径转向, 在两段圆弧相切点处车辆方位角达到最大值, 其值为

$$\theta_{\max} = \arccos\left(1 - \frac{p_2 - \frac{B}{2} - \Delta}{2r_{\min} - w}\right) \quad (12)$$

其中:  $\Delta$  为安全缓冲距离;  $p_2$  为侧边库底距车轴对称线的纵向距离;  $r_{\min}$  为最小转弯半径;  $B$  为车宽。

在两段式泊车路径规划中, 泊车路径形似“S”。一般拟合“S”曲线的函数有反正切函数  $y = \arctan(1 + x)$  和 Sigmoid 函数<sup>[3]</sup>  $y = \frac{1}{1 + e^{-x}}$ 。考虑到函数拟合计算的实时性问题与泊车运动曲线曲率要求, 即初始位置曲率为 0, 运动过程中曲率连续, 因此选用 Sigmoid 函数作为拟合函数拟合两段式泊车路径:

$$y = \frac{a_1}{1 + e^{\frac{a_2(x-a_3)}{a_4}}} + a_4 \quad (13)$$

此函数具有 4 个拟合参数, 分别为  $a_1$   $a_2$   $a_3$   $a_4$ , 其 2 阶导数为

$$\ddot{y} = \frac{2a_1 a_2^2 e^{-2a_2(a_3-x)}}{(1 + e^{-a_2(a_3-x)})^3} - \frac{a_1 a_2^2 e^{-a_2(a_3-x)}}{(1 + e^{-a_2(a_3-x)})^2} \quad (14)$$

该拟合函数的 2 阶导数连续, 表明函数曲率连续变化, 即车辆沿这条路径运动时转向角无突变。同时,  $-a_2 a_3$  的取值可以保证该函数的曲率在  $x = 0$  时趋近于 0, 即车辆在泊车起始位置处前轮转向角为 0。为验证两段式泊车路径规划函数拟合效果, 设计 3 种仿真工况参数, 如表 1 所示。表 2 是根据 3 种工况得到的拟合参数。路径拟合结果见图 4。

表 1 仿真工况参数

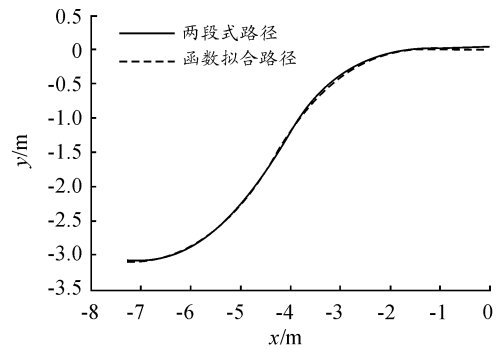
Table 1 Simulation parameters

参数	工况 1	工况 2	工况 3
水平距离 $h_1$ / m	2	3	4
水平距离 $h_2$ / m	9	10	11
垂直距离 $p_1$ / m	2	3	2.5
垂直距离 $p_2$ / m	4.2	5.2	5

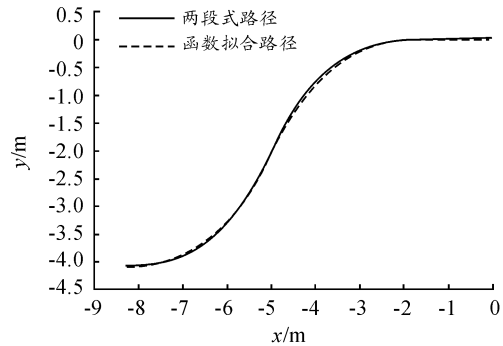
表 2 函数拟合参数

Table 2 Function fitting parameter

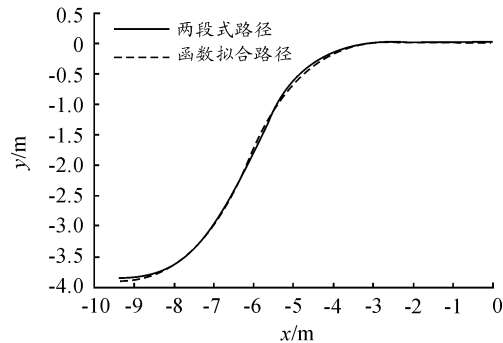
拟合参数	工况 1	工况 2	工况 3
$a_1$	-3.173 1	-4.126 2	-3.937 5
$a_2$	1.412 5	1.410 6	1.405 8
$a_3$	-4.300 7	-4.999 2	-6.148 2
$a_4$	0.040 4	0.018 2	0.023 1



(a) 工况1



(b) 工况2



(c) 工况3

图 4 路径拟合结果

Fig. 4 Path fitting results

为检验函数拟合优度, 可用决定系数来定量评价, 其计算公式为



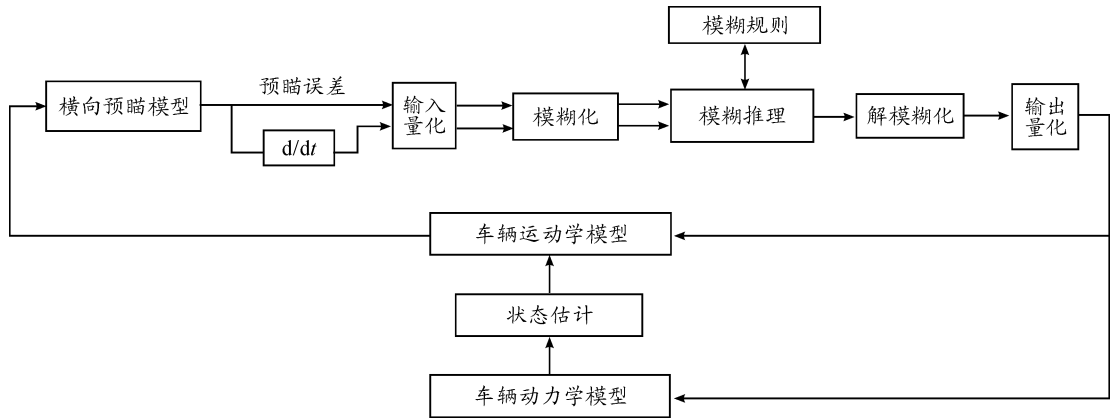
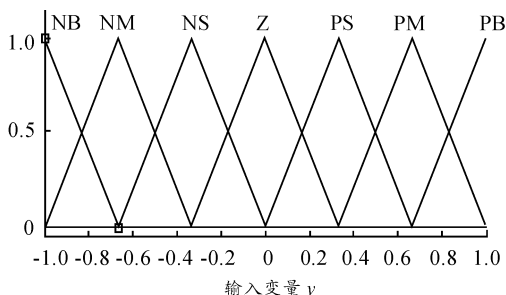
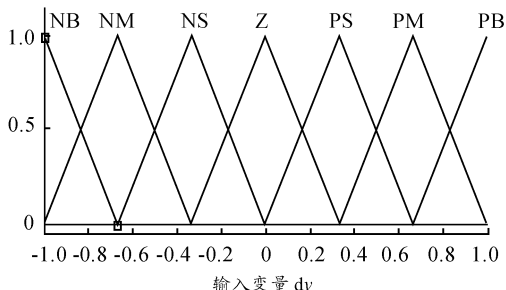


图 6 预瞄闭环控制系统

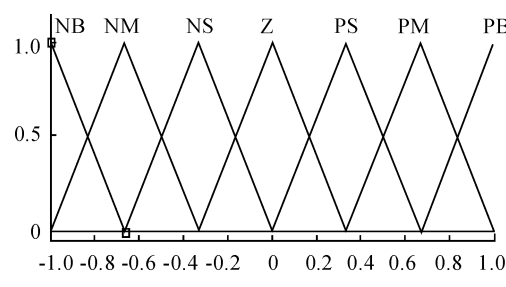
Fig. 6 Preview closed-loop control system



(a) 横向预瞄误差



(b) 横向预瞄误差变化率



(c) 转向外轮转角

图 7 隶属度函数

Fig. 7 Membership function

图 7 中 ,NB ,NM ,NS ,Z ,PS ,PM ,PB 分别代表“负大”、“负中”、“负小”、“零”、“正小”、“正中”、

“正大” 模糊规则采用 if  $E$  and  $EC$  then  $U$  ,共产生 49 条规则 ,如表 3 所示。由规则生成的模糊控制面如图 8 所示。

表 3 模糊规则

Table 3 Fuzzy rule

$U$	$E$						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NM	NS	Z
NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z	PS
NS	NM	NM	NS	NS	Z	PS	PS
EC	Z	NM	NS	Z	PS	PS	PM
PS	NS	NS	Z	PS	PS	PM	PM
PM	NS	Z	PS	PS	PM	PB	PB
PB	Z	PS	PM	PM	PM	PB	PB

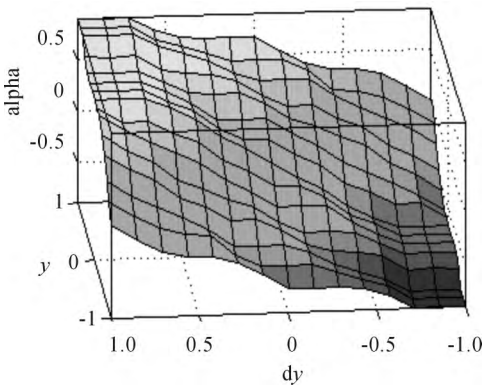


图 8 模糊控制面

Fig. 8 Fuzzy control surface

### 3 测试场景设计与仿真

某乘用车的外形参数如表 4 所示。

表 4 某乘用车外形参数

Table 4 Shape parameters of a passenger car

名称	符号	数值
前悬	$l_f/m$	0.82
后悬	$l_r/m$	0.88
轴距	$l/m$	2.58
车长	$L/m$	4.28
车宽	$B/m$	1.82
轮距	$w/m$	1.57

#### 3.1 基于 Matlab 的仿真验证

针对以上的两段式泊车路径规划以及基于横向预瞄的模糊控制路径追踪控制方法,采用 Matlab/Simulink 构建控制系统仿真框图,对本文提出的自动泊车控制方法进行验证。图 9 是 3 种工况下的仿真结果。

从图 9 可知:预瞄模糊控制能有效控制车辆沿着理想轨迹运动,其误差在可接受范围内,并且方向盘转角也在初始位置由 0 逐渐增大,变化过程中并无突变,满足泊车要求。车辆泊入车库后,相对车库位置比较靠后,还需要前进一段距离驶到车库中间位置。仿真结果表明:基于预瞄模糊控制的平行泊车算法计算实时性好、鲁棒性强,具有较高的工程实用价值。

#### 3.2 基于 PreScan 的仿真验证

PreScan 是专业的主动安全设计与环境、传感器建模仿真软件,可以很大程度上还原真实场景,提高仿真的准确度与真实性。本文以 PreScan 场景为基础,结合软件中的超声波传感器,建立自动泊车仿真环境,实时验证控制算法的正确性。图 10 是构建的 PreScan 场景,图 11 是工况 2 的泊车过程实时仿真结果。

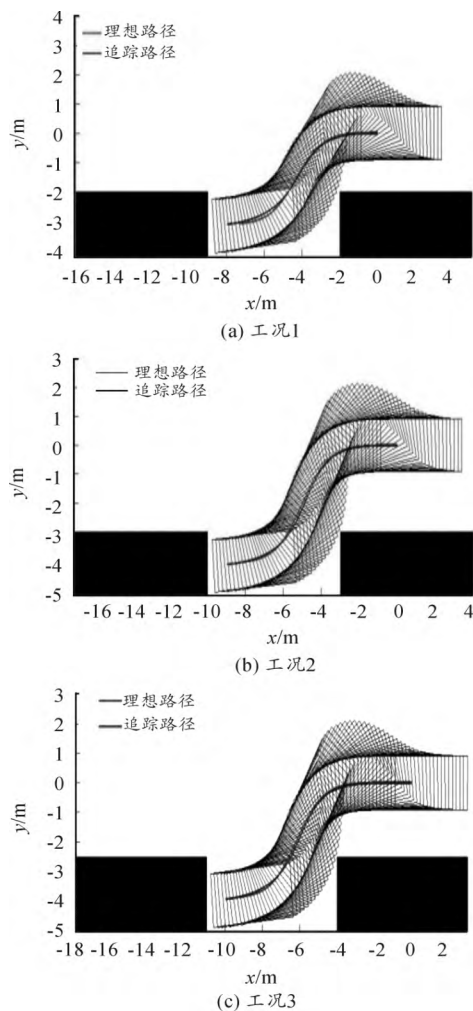


图 9 自动泊车仿真结果

Fig. 9 Simulation results of automatic parking



图 10 PreScan 场景

Fig. 10 PreScan scene

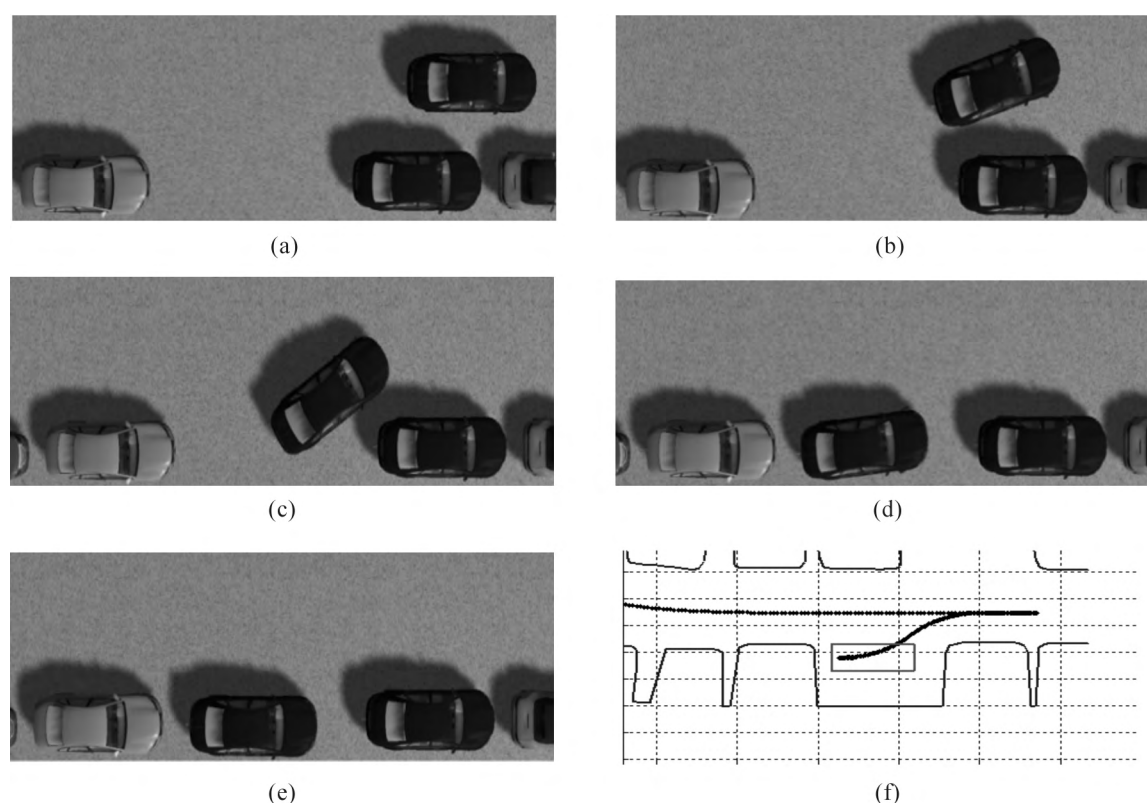


图 11 PreScan VisViewer 与 GUI 仿真过程

Fig. 11 PreScan VisViewer and GUI simulation process

工况 2 的自动泊车过程可分为 5 个阶段: (a) 汽车低速前进, 启动自动泊车程序, 超声波传感器启动, 开始搜索车位; (b) 发现车位, 减速停车, 根据超声波传感器获取的泊车环境信息重构空间坐标, 规划两段式泊车路径并拟合, 完成后挂入倒挡开始泊车; (c) 预瞄模糊控制算法实时计算汽车前轮转角, 利用转向比计算方向盘转角, 实现转向控制; (d) 顺利泊入车位, 为使车辆停在车库中间, 还需要前进修正一次; (e) 前进修正完成泊车; (f) GUI 仿真过程展示了超声波传感器获取的环境信息, 其中虚线是车辆运动轨迹, 实线是障碍轮廓。

#### 4 结束语

本文针对目前自动泊车系统转向不连续问

题, 提出了基于两段式泊车的路径规划方法, 建立了横向预瞄模型, 采用模糊控制方法对理想路径进行了追踪控制, 并通过仿真验证了控制算法的有效性。

采用两段式泊车, 设计了一条路程最短的路径, 利用 Sigmoid 函数, 对两段式泊车路径进行了参数拟合。结果表明: 其拟合决定系数达到 0.99 以上, 函数曲线满足泊车过程中曲率要求。

研究了基于预瞄模糊控制的闭环控制平行泊车算法, 通过控制汽车转向外轮转角, 实现了对理想路径的追踪控制, 其计算精度能满足要求, 在不同的车库尺寸及初始位置条件下, 均能顺利泊入车库; 基于 PreScan 搭建了自动泊车的场景模型, 联合 Matlab/Simulink 控制仿真, 验证了自动泊车控制算法的有效性和正确性, 通过真实泊车场景的构建, 直观再现了控制算法的效果。



## 参考文献:

- [1] 郭孔辉,姜辉,张建伟,等. 基于模糊逻辑的自动平行泊车转向控制器[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39 (S2): 236-240.  
GUO Konghui, JIANG hui, ZHANG Jianwei, et al. Automatic parallel parking steering controller based on fuzzy logic control theory[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2009, 39 (S2): 236-240.
- [2] PAROMTCHIK I E, LAUGIER C. Autonomous Parallel Parking and Returning to Traffic Maneuvers [C]//Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems. Grenoble, France: [s. n.], 1997: 21-23.
- [3] 李红,郭孔辉,宋晓琳,等. 基于 Matlab 的多约束自动平行泊车轨迹规划[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(1): 101-107.  
LI Hong, GUO Konghui, SONG Xiaolin, et al. Trajectory planning of automatic parallel parking with multi-constraints based on Matlab[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44 (1): 101-107.
- [4] ZHAO Y N, COLLINS E G. Robust automatic parallel parking in tightspaces via fuzzy logic [J]. Robotics and Autonomous Systems 2005, 51 (5): 111-127.
- [5] CHANG S J, LI J. Design and implementation of fuzzy parallel parking control for a car-type mobile robot [J]. Journal of Intelligent & Robotic System, 2004, 34 (2): 175-180.
- [6] 吴冰,钱立军,虞明,等. 基于 RBF 神经网络的自动泊车路径规划[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014, 35 (4): 459-540.  
WU Bing, QIAN Lijun, YU Ming, et al. Path planning of automatic parallel parking based don RBF neural network [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science) 2014, 35 (4): 459-540.
- [7] POHL J, SETHSSON M, DEGERMAN P, et al. A semi-automated parallel parking system for passenger cars [J]. J Automobile Engineering 2006, 220: 53-65.
- [8] COLYER R E, ECONOMOU J T. Comparison of steering geometries for multi-wheeled vehicles by modelling and simulation [C]// Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control. USA: IEEE, 1998: 3131-3133.
- [9] 乔维高,徐学. 无人驾驶汽车的发展现状及方向[J]. 上海汽车, 2007(7): 40-44.  
QIAO Weigao, XU Xue. Development status and direction of driverless cars [J]. Shanghai automobile, 2007 (7): 40-44.
- [10] SEBASTIAN T, MIKE M, HENDRIK D, et al. Stanley The Robot that Won the DARPA Grand Challenge [J]. Journal of Field Robotics 2006, 23(9): 661-692.
- [11] CHEN Q, OZGUNER U, REDILL K. Ohio State University at the 2004 DARPA Grand Challenge: Developing a Completely Autonomous Vehicle [J]. IEEE Intelligent Systems 2004, 19(5): 8-11.
- [12] CEM H, OZGUNER U, KEITH A. Redmill. Automated Lane Change Controller Design [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System 2003, 4(1): 13-22.
- [13] KRISTIJIAN M, ROLAND P, ROLAND S. Path Following for Autonomous Vehicle Navigation with Inherent Safety and Dynamic Margin [C]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium [C]. USA: IEEE, 2008: 108-113.
- [14] 赵玲. 平行泊车方法研究与仿真 [D]. 西安: 长安大学, 2009.  
ZHAO Ling. Research and Simulation of parallel parking method [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.

(责任编辑 刘 舸)