

# 基于路径规划和双闭环控制的泊车系统研究

陈佳佳<sup>1,2,3</sup> 梅涛<sup>3</sup> 祝辉<sup>3</sup>

(1. 中国科学院合肥智能机械研究所 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学 合肥 230027;  
3. 中国科学院合肥物质科学研究院先进制造技术研究所 常州 213000)

**摘要:** 针对智能车辆垂直自主泊车的要求,采用分层自适应的方法设计了1种自动泊车系统,主要通过高精度的激光雷达进行车位的检测,运用轮速传感器进行车辆的定位,规划出了1条三段式泊车轨迹,并且采用了多路双闭环的控制算法对车辆进行轨迹跟踪控制。实验表明,该套系统可以有效地实现车辆的自主泊车,且控制精度高,系统稳定。

**关键词:** 自动泊车系统;路径规划;多路双闭环控制

**中图分类号:** U461 **文献标识码:** A

## Study of autonomous vehicle parking system based on path planning and the double-closed loop method

Chen Jiajia<sup>1,2,3</sup> Mei Tao<sup>3</sup> Zhu Hui<sup>3</sup>

(1. Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031;  
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230027; 3. Institute of Advanced Manufacturing Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Changzhou 213000)

**Abstract:** According to the requirement of autonomous vehicle parking of intelligent vehicles, a autonomous parking system based on the method of hierarchical adaptive control is designed in this paper, which mainly takes laser radar as sensor to detect the parking space. By using the wheel speed sensor to locate the vehicle, this system plans a parking trajectory with three steps, and use the multiplex double-closed loop method for the trajectory tracking control of the vehicle. The experiment shows that this system can realize the vehicle's autonomous vertical parking with high control precision and good control effect.

**Keywords:** autonomous vehicle parking system; path planning; multiplex double-closed loop control

## 0 引言

近年来,随着经济的发展和人民生活水平的提高,车辆保有量的增加使得城市内的可用空间急剧减少,尤其是泊车问题,对于经验不足的驾驶员来说,是一个比较大的困扰,由于不熟练而导致的各种车辆事故也很多。目前,只有数家汽车公司,如丰田、本田、大众等将自动或辅助泊车系统应用到少数中高档轿车中,我国的汽车厂商还没有生产出完全成型的自主泊车系统,因此,进行自动泊车系统的研究有重大的学术及经济意义。自动泊车技术对环境感知、路径规划、控制跟踪等方面技术要求甚高,我国在这方面的研究正处于起步阶段,主要集中在理论仿真验证阶段。国家对此非常重视,2010年10月,为了推动我国无人车智能化水平的提高,国家自然科学基金委在西安举办了“智能未来”无人车挑战赛。这次比赛中就设置了2个关于泊车的任务。

国外的研究开展地比较早,比如芝加哥大学的 Paromtchik<sup>[1]</sup>提出了非完整约束条件下平行泊车的方法;

美国佛罗里达大学的 Yanan Zhao 等<sup>[2]</sup>提出了在紧凑空间中基于模糊逻辑的自动平行泊车鲁棒控制算法。在此,本文作者采用分层自适应的方法设计了1种自主泊车系统,运用轮速传感器进行车辆的定位,规划出了1条三段式泊车轨迹,并且采用了多路双闭环的控制算法对车辆进行轨迹跟踪控制。

## 1 汽车动力学模型

### 1.1 模型建立

由于智能车辆在进行泊车时,车辆行驶的速度一般比较低,因此,不需要考虑离心力的作用及轮胎与地面打滑的情况。建模时,假定轮胎为刚体转盘。图1为车辆在笛卡尔坐标系下的模型<sup>[3-6]</sup>。

$$\dot{x} = v \cdot \cos\theta \quad (1)$$

$$\dot{y} = v \cdot \sin\theta \quad (2)$$

$$\dot{\theta} = v \cdot \tan\theta/L \quad (3)$$

式中:  $\theta$  为车辆的朝向角,即车辆的纵轴与  $x$  轴的夹角;  $\delta$  为车辆的转向角;  $L$  为车辆的轴距;  $x, y$  为车辆后轴中心在笛卡尔坐标系下的坐标。

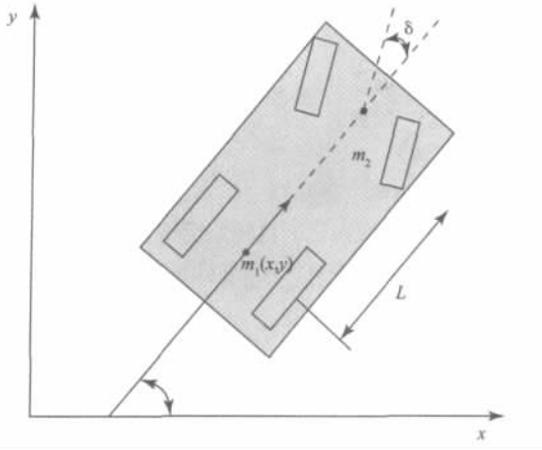


图1 车辆在笛卡尔坐标系下的模型

### 1.2 车辆参数确定

本文以奇瑞瑞虎车为实验对象,车辆为前轮转向,后轮可以代表车辆运动轨迹,假设车辆速度恒定,车辆参数如表1所示。

## 2 泊车系统结构

### 2.1 泊车任务简介

在“智能未来”无人车挑战赛中,泊车主要分为有障碍定点泊车与寻位定点泊车两种,如图2与图3所示。这里,主要介绍有障碍定点泊车,寻位定点泊车与其算法上类似。

在有障碍定点泊车中,车辆必须在白线区域内,不接触其他障碍车辆的前提下完成泊车任务。

### 2.2 泊车系统硬件结构

泊车系统的硬件平台如图4所示。Sick激光雷达可以准确地感知前方一片区域内的障碍物信息,与上位机通过串口连接。上位机是系统的核心,负责检测数据处理,决策,规划等任务,转向控制与制动控制模块通过CAN网络接收上位机发送的转角与制动信号。

表1 车辆参数表

整车质量/kg	转动惯量/ (Iz/kg·m <sup>2</sup> )	轴距/ (L/m)	质心至 前轴距离/ (a/m)	质心至 前后轴 距离/(b/m)	车轮轮距/ (d/m)	车体质心 高度/(hg/m)	前轮总侧偏刚度/后轮总侧偏刚度/ (Gf/N·rad <sup>-1</sup> ) (Gr/N·rad <sup>-1</sup> )
2 325	4 132	3.025	1.430	1.5	0.5	40 000	48 000 1.595

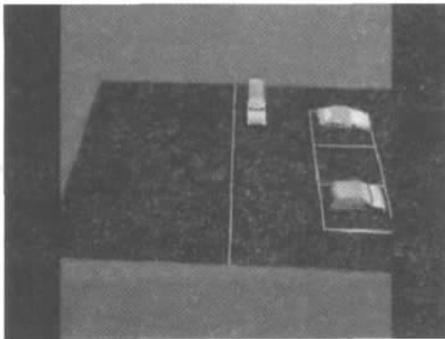


图2 有障碍定点泊车

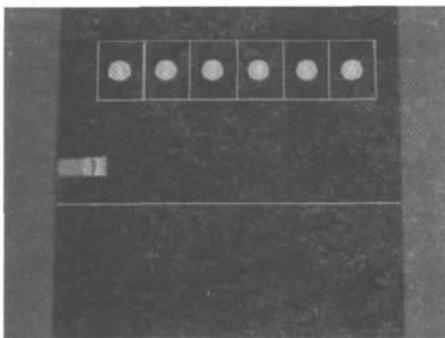


图3 寻位定点泊车

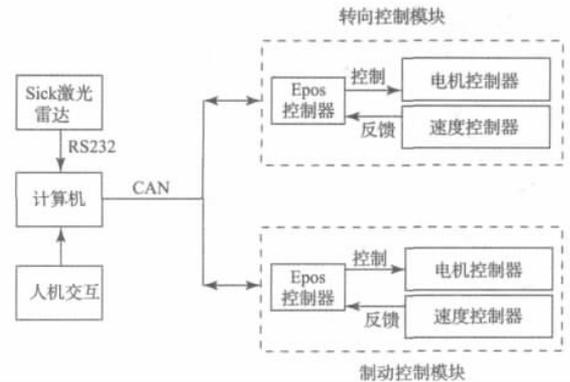


图4 泊车系统硬件

## 3 路径规划和控制算法

### 3.1 路径规划

在满足以上运动学模型和约束的前提下,如何规划出1条合理的参考路径,是车辆自动泊车系统的关键。

文章在前人的基础上<sup>[7-8]</sup>,将路径规划成2条相切圆弧和1条直线,如图5所示。虚线为车辆预计轨迹。当车辆进入泊车区域后,如图5所示,在  $P_0$  点时,利用车辆前方雷达测量出车位中轴线距离车辆的横向和纵向距离  $L_1, L_2$ ,此时,可规划出1条三段式泊车轨迹,如图5所示。

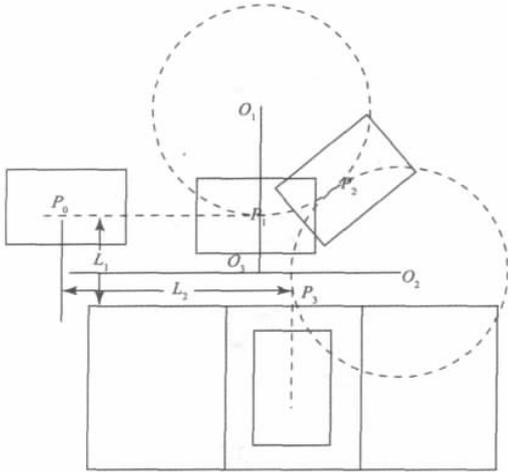


图 5 车辆泊车轨迹

在途中,  $P_0$  点为泊车的起始点,  $P_1$  点为第一个转向点,  $P_2$  为倒车点。在  $P_1$ 、 $P_2$  点的方向盘转角都使得车辆在最小半径下行驶, 显而易见, 这样对泊车环境的要求最为宽松, 更加地节约空间。同时, 根据均值不等式易知, 当  $O_1O_2O_3$  三角形为等角三角形时, 路径长度取最小值, 是最优解。

根据几何关系, 易知:

$$(a+r)^2 + (b+r)^2 = (2r)^2 \quad (4)$$

$$\left(\frac{a+r}{2r}\right)^2 + \left(\frac{b+r}{2r}\right)^2 = 1 \quad (5)$$

车辆从初始位置到驶入车库的总路径长度为  $S$ 。

$$S = L_2 - a + L_1 - b + \arcsin\left(\frac{a+r}{2r}\right) \cdot r + \arcsin\frac{b+r}{2r} \cdot r \quad (6)$$

$$\frac{S}{2r} = \frac{L_1 + L_2}{2r} + r - \frac{a+r}{2r} - \frac{b+r}{2r} + \frac{\arcsin\left(\frac{a+r}{2r}\right)}{2} + \arcsin\left(\frac{b+r}{2r}\right) \quad (7)$$

$$\arcsin x = x = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \frac{x^{2n+1}}{2n+1} \quad (8)$$

$$x \in [-1, 1]$$

根据  $\arcsin x$  的 Taylor 展开式可得:

$$\frac{S}{2r} = \frac{L_2 + L_1}{2r} + r - \frac{(a+r)}{2} - \frac{(b+r)}{2} \quad (9)$$

由 Cauchy-Buniakowsky-Schwarz 不等式和式(5), 易知: 当且仅当  $a = b$  的时候, 等式(7)即等式(6)有最小值。

从图 5 中根据几何关系, 可以得出:

$$a = b = 2r \frac{\sqrt{2}}{2} - r \quad (10)$$

$$S_0 = L_2 - a \quad (11)$$

$$S_1 = S_2 = \frac{\pi}{4}r \quad (12)$$

依照图 5, 式中:

$a$  为  $P_1O_3$  的距离;

$b$  为  $P_3O_3$  的距离;

$S_0$  为  $O_1O_3$  的距离;

$S_1$  为  $P_0P_1$  的距离;

$S_2$  为  $P_1P_2$  的弧长;

$S_3$  为  $P_2P_3$  的弧长;

### 3.2 泊车过程

输入: 车速(用于计算制动距离); 转向电机转角反馈; 制动电机转角反馈; 档位电机转角反馈; Sick 数据。

输出: 制动电机转角; 转向电机转角; 档位电机转角; 泊车的流程:

1) 如图 5 所示。在  $P_0$  点时, 通过雷达测量得到中轴线距离车辆的纵向距离  $L_2$ , 开启轮速传感器, 实时计算车辆行驶过距离;

2) 当车辆行驶距离等于  $P_0$  到  $P_1$  点的距离  $S_1$  时, 制动, 轮速传感器清 0; 方向盘左转一定角度  $\alpha_1$ , 发动汽车;

3) 当车辆行驶距离等于弧长  $S_2$  时, 制动, 轮速传感器清 0, 方向盘右转一定角度  $\alpha_1$ , 将车辆档位从前进挡换位后退挡, 发动汽车;

4) 当车辆行驶距离等于弧长  $S_3$  时, 制动, 轮速传感器清 0, 方向盘回正, 发动汽车。

5) 车辆在后退过程中, 利用汽车前方雷达实时测量前方一定范围内有无障碍出现, 如果有障碍出现, 证明车辆已停至车位内, 这时应制动, 泊车结束; 反之, 则应继续倒车过程。

### 3.3 控制算法

在控制方法上, 本文创新性地采用了多路双闭环控制算法<sup>[9-14]</sup>, 如图 6 所示。经过实验与比赛的验证, 这种方法可以准确, 实时地跟踪预定轨迹, 到达预期的控制目的。决策系统将规划出的轨迹通过网络发送给协调控制器, 协调控制器根据车辆当前位置, 将转角、制动及灯光喇叭信号转发给不同的控制器或系统, 控制器采用闭环控制, 使得系统响应速率加快, 控制精确, 无人驾驶车辆主要通过轮速传感器反馈车辆行驶距离, 这样, 就可以判断出车辆对预定轨迹的完成情况。

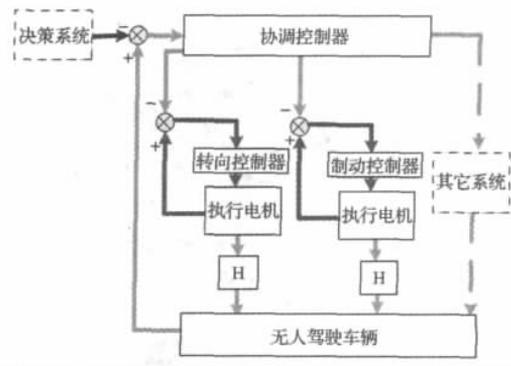


图 6 无人车控制系统

## 4 实车实验

### 4.1 实验流程

以上所提出的自主泊车方法已成功用于作者所在课题组自行研制的“智能先锋”号智能车上,并且在2010年中国“智能未来”无人车挑战赛的泊车测试中取得优异成绩。整个自主泊车过程如图7、图8、图9所示。实验环境依照比赛环境严格制定,以国标为参考。

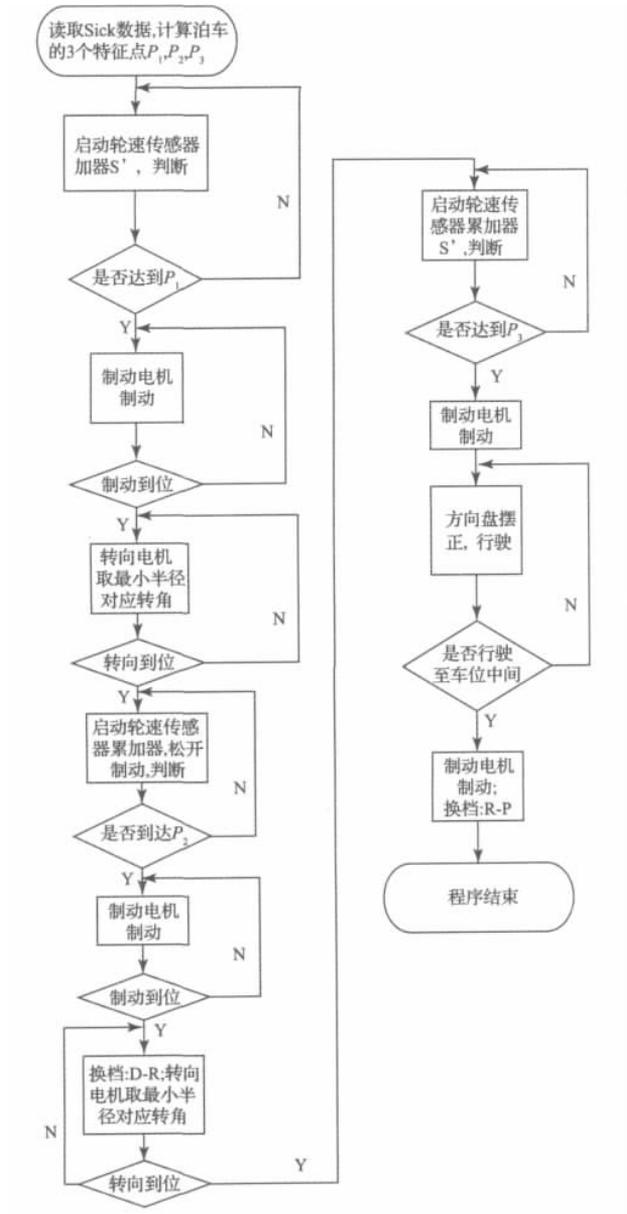


图7 无人车泊车过程框图



图8 无人车在比赛起点处



图9 无人车顺利完成比赛

### 4.2 实验结果

比赛要求车辆在泊车过程中不能够跨过白线,进入车位的过程中也不可以碰撞相邻车位的障碍物。在此前提下,以完成时间最短为衡量成绩的标准。“智能先锋号”使用这套算法,在比赛中,泊车速度快,轨迹控制精确,轻松地完成了任务。

## 5 结论

本文采用激光雷达作为探测泊车位的传感器,基于无人车的基本驾驶行为,设计了1种简单的三段式路径规划算法。该算法速度快,路径平滑无震荡,实现了有效避障。同时,采用了多路双闭环控制算法,使得路径跟踪更加精确、实时性更强。

### 参考文献

- [1] PAROMTCHIK I E, LAUGIER C. Autonomous parallel parking of nonholonomic vehicle [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 1996: 3117-3122.
- [2] ZHAO Y N, EMMANUEL G, COLLINS J. Robust automatic parallel parking in tight spaces via fuzzy logic [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2005,

- 54: 111-127.
- [3] HASHIMOTO N, KATO S, TSUGAWA S. A study on system for improving parking operation of elderly drivers-assistance and instruction [C]. USA: Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety Columbus, 2008: 22-24.
- [4] 史小磊, 王春香. 基于激光雷达的自动泊车系统[J]. 机电一体化, 2010(3): 72-74.
- [5] 徐津津. 双向路径规划在垂直自动泊车系统中的仿真研究[J]. 天津汽车, 2008(5): 36-39.
- [6] 甘志梅, 王春香, 杨明. 基于激光雷达的车辆跟踪与识别方法[J]. 上海交通大学学报, 2009, 46(6): 923-926.
- [7] 蒋志文, 曾祎. 基于双目视觉和路径规划的车辆自动泊车系统[J]. 公路与汽运, 2008(4): 69-72.
- [8] 何建国, 张文胜, 赵根庄. 智能泊车引导方法的研究与实现[J]. 地理空间信息, 2007(4): 1-5.
- [9] 徐克宝, 王军成, 曾庆良, 等. 自学习式 GPS 车辆自主导航仪的研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(2): 317-321.
- [10] 李鑫, 徐勇, 邓涛. 电子地图匹配算法在 GPS 和 DR 组合车载导航系统中的作用[J]. 国外电子测量技术, 2006, 25(5): 9-11.
- [11] 杜宇人, 周爱军. 一种基于视频图像的运动车辆跟踪方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(3): 45-48.
- [12] 曹洁, 屈展. 基于最佳成熟时间法的车辆路径规划[J]. 电子测量技术, 2009, 32(7): 36-39.
- [13] 聂文华, 薛燕荣. 基于行为反应控制的 UCAV 自主航路规划研究[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(4): 52-57.
- [14] 石为人, 王楷. 基于 Floyd 算法的移动机器人最短路径规划研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(10): 2088-2092.

#### 作者简介

陈佳佳, 1986 年出生, 汉族, 安徽合肥人, 中国科技大学硕士研究生, 主要从事检测与自动化技术研究。  
E-mail: Nicky127@mail.ustc.edu.cn

(上接第 7 页)

#### 参 考 文 献

- [1] 尹成群, 黄雷, 宋文妙, 等. 适用于宽带电力线通信的 LDPC 码译码算法的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(3): 27-28.
- [2] 谢涛, 何怡刚, 姚建国, 等. 基于改进 BP 算法的微带射频带通滤波器设计[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(6): 1318-1319.
- [3] CAVUS E, DANESHRAH B. A performance improvement and error floor avoidance technique for belief propagation decoding of LDPC codes[C]. Berlin: in Proceedings of the 16th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005: 2386-2390.
- [4] CAVUS E, DANESHRAH B. An IS simulation technique for very low BER performance evaluation of LDPC codes [C]. Proceeding of IEEE International Conference on Communications, 2006: 1095-1100.
- [5] HU X Y, ELEFTHERIOU E, ARNOLD D M. Regular and irregular progressive edge-growth Tanner graphs [J]. IEEE Trans, 2005, 51: 386-398.
- [6] LU J, MOURA J M F. Structured LDPC codes for high-density recording: large girth and low error floor [J]. IEEE Trans, Magnetics, 2006, 42: 208-213.
- [7] ZHANG Y, RYAN W E. Toward low LDPC-code floors: a case study[J]. IEEE Trans, Commun, 2009, 57: 1566-1573.
- [8] 杨成恩, 陆荣, 吴斌. 现代通信系统不规则 LDPC 系统码字构造方法[J]. 国外电子测量技术, 2009, 28(8): 21-22.
- [9] HAN Y, RYAN W E. Low-floor decoders for LDPC codes [J]. IEEE trans, Commun, 2009, 57(6): 1663-1672.
- [10] ALGHONAIM E, EL MALEH A, LANDOLSI M A. New technique for improving performance of LDPC codes in the presence of trapping sets[J]. EURASIP, 2008(4): 1-12.
- [11] 许成谦, 赵振国. LDPC 码差分译码算法[J]. 电子测量技术, 2009, 32(4): 132-134.

#### 作者简介

张大伟, 男, 1984 年出生, 河南周口人, 硕士, 91872 部队, 主要研究方向为信息通信技术。  
E-mail: yqgl1225@126.com