

一种基于路径规划的自动平行泊车算法*

林蓁蓁^{1,2}, 李庆^{1,2}, 梁艳菊^{1,2}, 陈大鹏^{1,2}

(1. 中国科学院微电子研究所, 北京 100029; 2. 昆山市工业技术研究院 中国科学院微电子研究所昆山感知中心, 江苏 苏州 215347)

摘要: 针对城市中停车位狭小、现有自动泊车方法缺乏连贯性的问题, 提出一种自动平行泊车算法。对现有的五阶多项式路径规划方法加以改进, 并有针对性地设计罚函数, 采用遗传算法计算最佳泊车路径和最小泊车空间, 实现自动平行泊车。仿真结果表明, 该算法能快速有效地完成泊车, 车辆损伤小, 对空间的要求最低。

关键词: 平行泊车; 路径规划; 约束空间; 遗传算法; 二分法

中图分类号: TP182; TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)05-1713-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.05.029

Parallel parking algorithm based on autonomous path planning

LIN Zhen-zhen^{1,2}, LI Qing^{1,2}, LIANG Yan-ju^{1,2}, CHEN Da-peng^{1,2}

(1. Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Smart Center in Kunshan of IMECAS, Kunshan Industrial Technology Research Institute, Suzhou Jiangsu 215347, China)

Abstract: In order to solve problems of narrow parking space in cities and lack of continuity of vehicle's motion in other parking approaches, this paper proposed an autonomous parking algorithm. It improved the approach of fifth-order polynomial, and designed penalty function and genetic algorithm to calculate the best path and the tightest parking space, finally realizing automatic parallel parking. The simulation result indicates that this method can park a car swiftly and efficiently with slight impact on vehicles and the least space requirement.

Key words: parallel parking; path planning; constrained space; genetic algorithm; dichotomy

随着汽车数量的增加, 城市中停车位的空间逐渐减小, 给经验不足的驾驶员带来很大困扰。本文针对泊车中最困难的平行泊车问题, 提出了一种基于路径规划的恒速泊车方法, 帮助驾驶员安全顺利地实现自动泊车。

国外对于自动平行泊车的算法研究起步于 20 世纪 90 年代, 国内近几年来对该领域也有所涉及。概括起来主要有两种方法: 基于模糊控制和基于路径规划。文献[1, 2]中提出应用驾驶员的经验整理出控制规则, 可减小泊车过程中的位置误差, 但控制过程缺乏连贯的规划性, 需要反复调整车速和转向角, 且前后挪移需要较大的停车空间, 难以量化。而基于路径规划的方法根据车辆与停车位的相对位置算出最佳泊车路径, 便于泊车全过程的规划控制。文献[3]提出的路径需要不停地变速及换挡^[4], 不符合驾驶员操作的实际情况。相同的缺陷也存在于文献[5]中。文献[6]使用的双半径法需要在车速为零时改变转向角, 对车辆损伤较大; 文献[7]中提出了以五阶多项式作为平行泊车的规划路径, 但其未对约束空间加以限制, 需要较大的泊车空间。

本文在速度恒定的条件下, 提出了改进的五阶多项式路径规划方法, 并给出其约束空间。在此基础上, 采用遗传算法在可行的路径曲线族中精确寻优, 设计了高效的罚函数, 完成自动泊车。此外, 使用二分法搜索可行解空间, 计算出所述方法所需要的最小泊车位。

1 数学模型建立

1.1 车辆的数学模型

泊车过程中假定车辆保持恒定低速, 因此侧滑的影响忽略不计, 分析采用的车辆模型如图 1 所示, 各符号说明如表 1 所示。

表 1 符号说明

符号	说明	符号	说明
(x, y)	后轴中心点坐标	L	轴距
(x_{ef}, y_{ef})	右前顶点坐标	L_f	前悬
θ	车辆朝向与 X 轴夹角	W	车宽
φ	前轮转向角	v	车辆运动速度

运动学方程^[8, 9]及点坐标方程为

$$\dot{x} = v \cos \theta; \dot{y} = v \sin \theta; \dot{\theta} = \frac{v}{L} \sin \varphi$$

$$x_{ef} = x + (L + L_f) \cos \theta + \frac{W}{2} \sin \theta$$

$$y_{ef} = y + (L + L_f) \sin \theta - \frac{W}{2} \cos \theta$$

1.2 改进的五阶多项式路径规划

根据文献[7], 在已知泊车起止位置的条件下, 可以计算出表示泊车路径的五阶多项式。由于需要满足起止点车身平行于 X 轴、转向角为零的条件, 所需车位较大。实际泊车过程可有如下改进: 在停车路径和转向角之间进行折中, 以尽可能小的转向角停放于平行车位, 再略微向前行驶至车位正中, 同

收稿日期: 2011-10-14; 修回日期: 2011-11-16 基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KGCX2-YW-148)

作者简介: 林蓁蓁(1985-), 女, 福建福州人, 硕士研究生, 主要研究方向为车载嵌入式系统(linzhenzhen@ime.ac.cn); 李庆(1972-), 男, 吉林四平人, 副研究员, 主要研究方向为多传感器集成、数据融合; 梁艳菊(1985-), 女, 河南周口人, 博士研究生, 主要研究方向为图像拼接、立体视觉; 陈大鹏(1968-), 男, 安徽合肥人, 研究员, 博导, 主要研究方向为集成电路、MEMS。

时调整转向角与车辆平行。本文据此改进泊车路径规划算法,使其具有更大的适应性。

设车辆经过调整^[10],位于坐标为 (x_s, y_s) 、 $\theta_s = 0$ 、 $\varphi_s = 0$ 的泊车起点。泊车终点坐标 (x_e, y_e) 为车位远端,与车头保留20 cm的安全距离, $\theta_e = 0$,以倒车的方式泊入车位。泊车轨迹五阶多项式为 $y(x) = a_5x^5 + a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0$ 。由车身沿轨迹切线方向可知 $y'(x_s) = 0, y'(x_e) = 0$ 。由曲率定义 $k = d\theta/ds$,结合曲线弧长公式 $ds = \sqrt{1 + y'^2}dx$ 和车辆的运动学方程,可推得 $\sin \varphi = Lk$ 。因此,当 $y''(x_s) = 0$ 时,满足条件 $\varphi_s = 0$ 。将起止点坐标和导数条件联立,得到关于轨迹系数向量 A 的非齐次线性方程组,形如 $XA = Y$ 。由于 $r(X) = 5$,可知通解为 $A = \eta + c\xi$ 。其中: η 为特解, ξ 为导出组的基础解系。因此,平行泊车可能的轨迹为一组曲线,如图2所示。需要从中挑选在平行泊车约束空间之内且指标最优的曲线作为平行泊车的实施曲线。

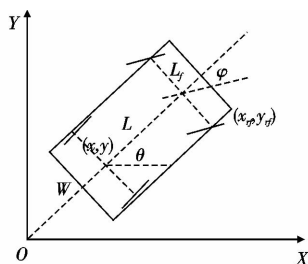


图1 车辆的数学模型

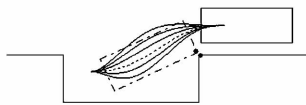


图2 泊车轨迹及约束空间示意

1.3 平行泊车的约束空间

平行泊车的约束空间包括最大转向角约束和避障约束。前者保证路径中所需的转向角小于车辆能达到的最大转向角,后者保证泊车过程中不与车位边缘发生碰撞。

对于最大转角约束,由 $\sin \varphi = Lk$ 可知,泊车轨迹的曲率必须满足 $|k| = \frac{|y''|}{(1 + y'^2)^{3/2}} < \frac{|\sin \varphi_{\max}|}{L}$ 。对于避障约束,车辆的右侧不能与车位的右上顶点 (P_x, P_y) 相撞。由文献[11],在倒车过程中保证车辆的右前顶点不与车位的右上顶点相撞即可,如图2中的两个圆点所示,当 $x_{yf} > P_x$ 时, $y_{yf} > P_y$ 。

2 遗传算法寻优

自动平行泊车需要在约束空间内寻找最佳起始位置,以及此位置下的最优五阶多项式路径曲线,使终止点处车辆转向角最小,将此路径作为平行泊车的指导路径。这实际上是复杂非线性约束条件下的多变量函数求极值问题,本文提出一种遗传算法使其达到理想效果。

需要编码的参数有起始点的坐标值 (x_s, y_s) 和多项式系数通解 $A = \eta + c\xi$ 中的常数 c ,采用浮点数编码方法生成种群。在计算个体适应度后,将其依照从小到大的顺序排序,每个个体的得分只与所在排序位置有关,并采用随机的单位选择策略,减小算法趋向于局部极值的可能性。交叉概率选为0.4,交叉算法为intermediate,即 $child = parent_1 + rand * ratio * (parent_2 - parent_1)$,以充分遍历父辈数据空间内的各点。最后在取值空间中进行变异运算,生成子代。下面详细阐述带罚函数的适应度函数设计。

在遗传算法的适应度函数中,需要考虑编码参数在非线性约束空间中这个限制条件。解决此类问题的主要方法有抛弃不可行解法、修复不可行解法、改变遗传因子法和罚函数法。抛弃不可行解法会导致搜索效率大大降低;修复不可行解法依

赖于问题,没有标准方法;改变遗传因子法不能解决非线性问题^[12];罚函数法有效地将遗传搜索引导到解空间中有希望的区域去,通过惩罚不可行解,将约束问题转换为无约束问题。目标函数和它共同作用以决定染色体的适应度函数^[13]。文献[14]中提出了一种带拉格朗日乘数的罚函数,将非线性约束进行取对数和平方等处理,并且需要不断增大拉格朗日乘数,进行多次迭代,计算复杂度高。本文对泊车问题有针对性地设计罚函数,仅对无效参数的个体实施有别于正常极值的惩罚,能高效求得可行的算法最优解。

算法中取个体适应度函数的最小值为最佳个体,带罚函数的适应度函数为

$$z = |k_0| + r_1 \max(0, P_y - y_{yf}) + r_2 \max(0, \Delta_1) + r_2 \max(0, \Delta_2)$$

其中: k_0 为终点处的曲率,是所求的适应度函数,曲率越小,车轮在终点处的转向角越小,曲线越佳;适应度函数的后续部分为罚函数, r_1, r_2 为惩罚系数; y_{yf} 为 $x_{yf} = P_x$ 时,车辆右前方顶点的Y轴坐标值,若 $P_y - y_{yf} > 0$,说明车辆右侧和车位发生了碰撞,差值越大,该参数组离可行区间越远; $\Delta_1 = L \max(K) - \sin \varphi_{\max}$, $\Delta_2 = -\sin \varphi_{\max} - L \min(K)$, K 为该个体下多项式曲率的变化范围。若 Δ_1 和 Δ_2 大于零,说明多项式表示的路径超过了车辆的最大转向角,差值越大,该参数组离可行区间越远。

当个体在约束空间内时,罚函数为零,适应度函数值为终点曲率;当个体不在约束空间内时,适应度函数值迅速增大,在后续迭代步骤中复制较少或丢弃。此方法对约束条件的线性和可微性没有限制,从而遗传算法最终将停留在约束空间内且适应度值最优的个体上。该个体确定了当前车位条件下的最优起始位置和规划路径。

3 仿真结果

3.1 平行泊车仿真

仿真使用丰田凯美瑞实车数据^[15],车长4.825 m,宽1.82 m,轴距2.755 m,最大转向角45°。以车位长度7.2 m为例,遗传算法采用每代80个个体,100代迭代过程,如图3所示,可以看到迭代过程收敛于曲率近乎于零的个体上,结果正确。

取第100代的最优个体 $x_s = 14.0506, y_s = 5.6427, c = 0.49546$,采用0.2 m作为仿真步长(即每行驶0.2 m后调整转向角),泊车仿真如图4所示。根据轨迹曲率和转向角的关系,泊车期间转向角的变化可描绘为如图5所示。

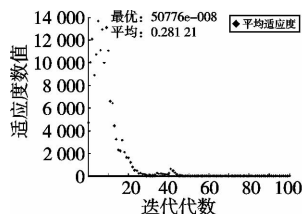


图3 遗传算法迭代结果

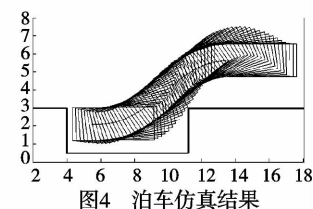


图4 泊车仿真结果

从图4中可以看出,遗传算法得到的最优起点和路径能使车辆泊入车位且正确避障;从图5中可以看出,泊车过程中转向角变化连续,不会对车辆造成损伤。上下两条虚线为车辆允许的最大转向角,曲线在其范围内,说明泊车全过程中转向角在约束空间内。由仿真结果可以验证,使用本文提出的改进的五阶多项式和带罚函数的遗传算法,能正确实现平行泊车;同时,该方法具有广泛的实用性,只要车位长度大于最小所需泊车空间,即可顺利完成平行泊车。

3.2 仿真步长限制

在仿真过程中,步长的选取存在上限,否则车辆将偏离停

车位,无法完全泊入。设车辆进行一次转向角计算和机械调整所需的时间为 t ,则步长 $\text{step} = vt$ 。令终点处允许的 y 方向上最大误差为 ε ,即 $y_{\text{final}} - y_e < \varepsilon$,结合车辆角度和位置的计算公式

$$\begin{cases} \theta_n = \theta_{n-1} - vt k(x_{n-1}) \\ x_n = x_{n-1} - vt \cos \theta_n \\ y_n = y_{n-1} - vt \sin \theta_n \\ y_{\text{final}} - y_e < \varepsilon \end{cases}, \text{可推得步长需要满足的条件}$$

为 $f(vt) = vt(\sin \theta_2 + \sin \theta_3 + \dots + \sin \theta_n) > y_s - y_e - \varepsilon$ 。使用3.1节中算出的仿真数据,绘制 $f(vt)$ 曲线如图6所示,虚线为不等式右端的数值,取 $\varepsilon = 0$ 。

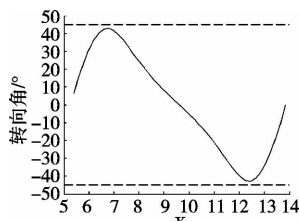


图5 转向角变化曲线

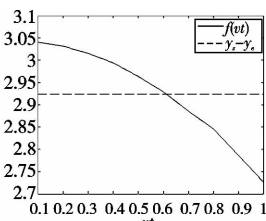


图6 仿真步长限制示意

可以看出,仿真步长取值不能太大,只有取值在两线交点左方的区域,才能实现正确泊车。

3.3 最小泊车空间计算

最小泊车空间可通过下面的方法计算:变换起始位置,在每个可行曲线族中寻找当 $y_{\text{fl}} = P$ 时最小的 X 轴坐标 x_{flmin} ,各位置中最小的 x_{flmin} 即为最小泊车空间。这是约束条件下的极值问题,同样可通过遗传算法解决。

由于在起止点已知的条件下,同一水平线上,转向角约束空间中路径曲线族的 X 坐标随着多项式系数通解中常数 c 的增大而减小,因此,该族中最小的 x_{fl} 值出现在 c 最大处。在计算遗传算法的适应度函数时,先找出可行路径中 c 的上限,再以此时的 x_{fl} 作为适应度函数值。寻找 c 上限的过程通过二分法递归实现,流程如图7所示。

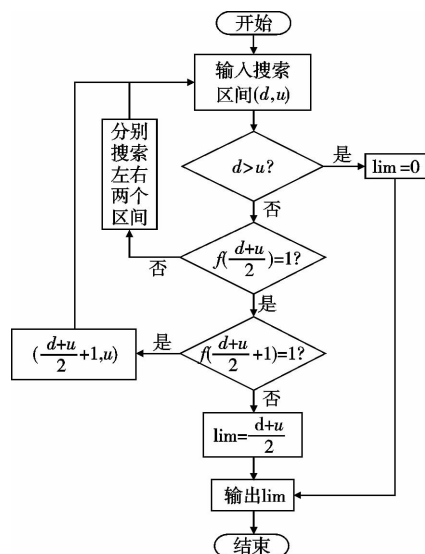


图7 二分法流程

图7中,函数 $f(x)$ 判断 x 所确定的路径曲线是否在转向角约束空间内,若是则函数值为1,否则为0。若通过遍历法查找约束空间中 c 的取值上限,计算复杂度为 $O(n)$;使用图7中所示的二分法查找,计算复杂度为 $O(\log n)$,可见使用二分法显著提高了运算速度。

用遗传算法计算的最小车位长度为6.502 m,将车位长度/车长的比值与其他文献中提出的方法比较,如表2所示。

表2 最小车位长度/车长比较表

本文	文献[16]	文献[1]	文献[5]	文献[6]
1.35	1.765	1.4	1.47	1.382

从表中可以看出,本文提出的路径规划及泊车方法优于现有方法,所需的车位长度最小。

4 结束语

本文提出了改进的五阶多项式路径规划方法,设计使用带罚函数的遗传算法实现了平行车位的自动泊车,并用二分法和遗传算法结合,给出所需最小车位长度。仿真实验表明,该算法所需的泊车空间最小、计算复杂度低,对于不同车型和车位的适用性强,便于实时应用。本文为智能泊车系统的开发、应用与普及提供了高效的解决方案。

参考文献:

- [1] ZHAO Y N, COLLINS E G. Robust automatic parallel parking in tight spaces via fuzzy logic [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2005, 5(51): 111-127.
- [2] LI T H S, CHANG S J, CHEN Yi-xiang, et al. Implementation of human-like driving skills by autonomous fuzzy behavior control on an FPGA-based car-like mobile robot [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2003, 50(5): 867-880.
- [3] PAROMTCHIK I E, LAUGIER C. Motion generation and control for parking an autonomous vehicle [C]//Proc of the 6th IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1996: 3117-3122.
- [4] LEE C K, LIN Chun-liang, SHIU B M. Autonomous vehicle parking using artificial intelligent approach [C]//Proc of the 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents. 2009: 496-501.
- [5] 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.
- [6] 王道斌, 梁华为, 杨妮娜, 等. 两种自主泊车路径规划方法的对比研究 [J]. *电子测量技术*, 2011, 34(1): 27-30.
- [7] LYON D. Parallel parking with curvature and nonholonomic constraints [C]//Proc of Intelligent Vehicles Symposium. 1992: 341-346.
- [8] DEMIRLI M K K, KHOSHNEJAD M. Autonomous parallel parking of a car-like mobile robot by a neuro-fuzzy sensor-based controller [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2009, 160(19): 2876-2891.
- [9] 程志江. 遗传算法在自动泊车辅助系统模糊控制中的应用 [J]. *模糊系统与数学*, 2010, 24(3): 160-167.
- [10] LI T H S, CHEN C Y, LIM K C. Combination of fuzzy logic control and back propagation neural networks for the autonomous driving control of car-like mobile robot systems [C]//Proc of the 49th SICE Annual Conference. 2010: 2071-2076.
- [11] 宋金泽, 戴斌, 单思忠, 等. 融合动力学约束的自主平行泊车轨迹生成方法 [J]. *中南大学学报*, 2009, 40(S1): 135-141.
- [12] 郭伟, 席裕庚. 基于精确罚函数法的遗传算法求解时延约束组播路由问题 [J]. *电子学报*, 2001, 29(4): 506-509.
- [13] 蒋泰, 陈洛均, 黄源. 带有约束优化的遗传算法求解TSP [J]. *计算机应用研究*, 2008, 25(5): 1323-1325.
- [14] CONN A R, GOULD N, TOINT P L. A globally convergent Lagrangian barrier algorithm for optimization with general inequality constraints and simple bounds [J]. *Mathematics of Computation*, 1997, 66(217): 261-288.
- [15] LEE C K, LIN Chun-liang, SHIU B M. Autonomous vehicle parking using hybrid artificial intelligent approach [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2009, 56(3): 319-343.
- [16] JIANG K, SENEVIRATNE L D. A sensor guided autonomous parking system for nonholonomic mobile robots [C]//Proc of International Conference on Robotics and Automation. 1999: 311-316.