

基于多属性决策的多车自主泊车路径全局规划方法

陈智雯¹, 李拙人¹, 吴俊贤², 冷搏¹

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 上海淞泓智能汽车科技有限公司, 上海, 201800)

摘要: 虽然自主代客泊车技术已经可以代替驾驶员完成泊车操作,但在多车辆且缺乏调度的情况下,容易造成交通混乱。为此,提出了一种基于多属性决策的多车自主泊车路径全局规划方法,旨在解决泊位分配不合理问题并降低泊车整体成本。首先,建立停车场泊位拓扑地图,基于直线和回旋线构建引导路径;然后,设计引导路径择优的准则和子准则,构建层次分析(AHP)择优体系,确定最优泊位及其引导路径;最后,确定泊车起终点位置,以回旋线为基准,根据泊位的碰撞约束条件计算泊车路径。此外,模拟了多车同时进入停车场的场景,仿真结果表明,该方法可以有效降低泊车成本,提高泊车效率。

关键词: 自主泊车;多车泊车;泊位分配;全局引导;路径规划

中图分类号: U491;U27

文献标志码: A

Multi-Attribute Decision-Based Global Planning for Multi-Vehicle Autonomous Parking

CHEN Zhiwen¹, LI Zhuoren¹, WU Junxian², LENG Bo¹

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Songhong Intelligent Automotive Technology Co., Ltd., Shanghai 201800, China)

Abstract: Although the autonomous valet parking technology is able to complete parking operations instead of drivers, the lack of scheduling of multiple vehicles can easily cause traffic chaos. This paper proposes a multi-attribute decision-based global planning method for multi-vehicle autonomous parking paths, which aims to solve the problem of unreasonable parking space allocation and reduce the overall cost of parking. First, a topological map of parking spaces is established to construct guided paths based on straight lines and clothoids. Then, the criteria and sub-criteria of the guided path selection are designed, and an analysis hierarchical process (AHP)

path selection system is constructed to determine the optimal parking space and its guided path. Finally, the parking starting and ending positions are determined, and the parking path is calculated based on the collision constraints of the parking space using the clothoids as the reference. The scenario of multiple vehicles entering the parking lot at the same time is simulated, and the simulation results show that the method can effectively reduce the parking cost and improve the parking efficiency.

Key words: autonomous parking; multi-vehicle parking; parking slot allocation; global guidance; path planning

随着自动驾驶技术的发展,智能汽车被认为是一种很有前途的技术。近年来,各种指定场景的自动驾驶技术逐渐开始落地实施。其中,自主代客泊车技术(AVP)被认为是最有落地前景的技术之一,其有助于解决驾驶员面临的驾驶经验不足、泊车空间狭小或时间不足等泊车问题^[1]。虽然通过地图与路径规划可以使自主泊车车辆更加聪明^[2],然而当车辆投入实际应用时仍然存在诸多问题亟待解决。首先,目前许多的自动代客泊车运动规划方法更多地聚焦于最后的泊车入库问题,而在此之前,自动驾驶车辆往往需要无目的地自行寻找可用泊位。由于泊位分配策略的缺乏,多辆自主代客泊车可能会因为争夺同一个泊位而导致交通拥堵和混乱。为了保证交通秩序和停车安全,需要对多辆自主泊车进行合理的泊位分配^[3]。此外,许多自主泊车的路径规划方法求解过于复杂,往往并不能在实际场景中得到快速有效的应用。以上问题都增加了自主代客泊车技术落地的难度。

为解决上述泊位择优问题,有学者采用多目标决策点来处理,根据目标基于多属性决策(MADM)

收稿日期: 2022-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(52002284);上海市科委科研计划(21DZ1203802)

第一作者: 陈智雯(2001—),女,本科生,主要研究方向为智能网联汽车和车路协同。E-mail: 1950109@tongji.edu.cn

通信作者: 吴俊贤(1990—),男,工学硕士,主要研究方向为智能网联汽车。E-mail: wujunxian@siac-sh.com

为驾驶员分配最佳的泊位^[4-5]。Li和Pei等^[6]提出了一种考虑3个具有代表性的决策因素(即步行时间、停车费用、空置泊位数量)和驾驶员的不同偏好的智能停车引导算法,来优化泊位的利用。除了如物理位置、距离和停车费用等停车场的静态属性,停车资源的可用性,分配均匀性等也是重要的考虑因素。停车资源的可用性通常用某种估计下的空置泊位数量的概率表示,Rajabioun等^[7]将其定义为目前空置的泊位数量与设施容量的占用率。现有的多数研究可以很好地解决单车泊位择优问题,但较少考虑多车泊位择优分配的情况。

针对以上问题,面向停车场多入口多出口的同时泊车场景,本文基于多属性决策方法,结合停车场的静态属性、均匀度和驾驶员偏好,构建层次分析(AHP)择优体系以确定最优泊位。同时,以回旋线为基准,构建泊车引导路径,并考虑泊位的边界碰撞条件等约束规划出完整的泊车路径。

1 问题定义

本文提出一种基于多属性决策的多车自主泊车路径全局规划方法,包括最优泊位分配,引导路径生成和泊车路径规划3个部分。提出如下假设:①所有的车辆和泊位都是相同的尺寸;②所有泊位都为

$$\begin{aligned} & \text{given } T=[T_{ba}], \boldsymbol{x}=[x_m], \boldsymbol{v}=[v_k^t], \boldsymbol{E}=[E_1 \cdots E_i], \boldsymbol{t}=[t_n] \\ & \text{find } \boldsymbol{x}^*=[E_k, A_h \cdots A_g, P_{st}] \\ & \text{min } J(E_1 \cdots E_i, A_1 \cdots A_y, P_1 \cdots P_z) \\ & \text{s.t. } g(T, \boldsymbol{x}, \boldsymbol{v}, \boldsymbol{t}) \geq 0, \text{ 且 } k \leq i \leq q, \text{ 且 } T_{st} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

2 泊位分配及引导路径生成

首先根据建立的停车场信息拓扑图构建泊位择优子目标,然后通过层次分析法确定各择优子目标的最优权值属性,并基于多属性决策方法求解最优

$$\begin{aligned} J_k &= \omega_1 C_{1k} + \omega_2 C_{2k} + \omega_3 C_{3k} + \omega_4 C_{4k} + \omega_5 C_{5k} \\ &= \omega_1 \sum_{j=1}^N |s_j| + \omega_2 \frac{\sum_{j=1}^N \kappa_j |s_j|}{\sum_{j=1}^N |s_j|} + \omega_3 \frac{\sum_{i=1}^S K_{bi}}{S} + \omega_4 D_4 + \omega_5 \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: C_{1k} 表示路径长度子目标,直接作用于经济性,其中 N 表示路径总节点数量, s_j 为当前节点与上一个节点间的路径长度; C_{2k} 表示路径点数子目标,主要作用于平滑性,其中 κ_j 表示当前节点与上一个节点间路径的曲率半径; C_{3k} 为空间均衡度子目标,主要

垂直泊位;③停车场内所有车辆以匀速行驶;④停车场内通过V2X实时共享车辆和泊位信息,停车场中央控制器完成停车场路径规划。

定义停车场包含 i 个出入口,由部分双向车道和部分单向车道以及泊位组成,其中有 q 个空余泊位,在此基础上,建立停车场信息拓扑图。停车场根据空间特征被划分为几个区域, T_{ba} 为 b 区域第 a 个泊位的占有情况, $T_{ba}=1$ 表示被占用, $T_{ba}=0$ 表示可使用。停车场出入口、道路的交叉口、转弯处以及泊位对应的道路位置被表示为节点 x_m ,其中, $x=\{A, E, P\}$ 表示节点类型, P 为泊车节点, E 为入口节点, A 为转换节点,若车辆能在非入口节点进行转弯或直行,则将该点定义为转换节点。假设该停车场共有 y 个转换节点, z 个泊车节点;车辆 v_k^t 为在 t_n 时刻从停车场第 k 个入口进入的车辆; P_{st} 为该车辆的最优泊位,该泊位满足可被使用; $A_h \cdots A_g$ 为组成该车辆引导路径的转换节点。于是可将问题定义为在给定泊位占有情况、停车场节点情况和车辆情况下,求解最优的泊位及其对应的道路节点,其表达式如式(1)所示。通过直线和回旋线连接相应节点,即可生成引导路径,并根据泊车节点信息生成泊车入库路径。场端给车辆提供从停车场入口至泊位的全局精准路径,以降低对车辆智能化的要求,车辆只需跟踪收到的路径行驶即可完成泊车。

泊位及其相应的道路节点。

2.1 泊位择优目标

基于泊位可提取的评价指标,设计的泊位择优系统总优化目标如式(2)所示。

作用于经济性,其中 S 表示第 b 个区域的泊位总数; C_{4k} 为停车难度子目标,主要作用于便捷性,若泊位两侧均有车辆,则将停车难度赋值为5,若均无车辆则赋值为1,若泊位只有一侧有车辆则赋值为4,若泊位位于端侧,则将难度赋值定义为3; C_{5k} 为步行距

离子目标,表示驾驶员从泊位至目的地需步行的距离,直接作用于便捷性,其根据泊车节点坐标 (x_A, y_A) 和目的地节点坐标 (x_B, y_B) 得出。

2.2 目标权重设计

综合以上多元指标,基于层次分析法(AHP)设计泊位择优目标权重体系,如图1所示。

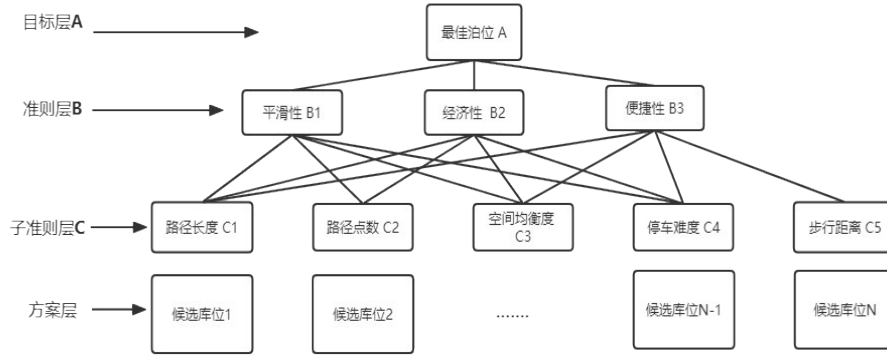


图1 泊位决策体系

Fig.1 System for berthing decisions

目标层 A 与准则层 B 指标两两比较,从而确定下层对于上层的重要程度,即为相对权重。 N 个准则层目标两两比较,利用数值表示相对重要程度,构成判断矩阵 B 。考虑到平滑性直接影响车辆行驶的平顺程度,根据实际需求,定义 τ_n 表示在 t_n 时刻从停车场进入的车辆的泊车代价权重,与 $t_{n+1} - t_n$ 的值成反比。便捷性直接影响驾驶员对泊位的心理偏好,本文设置其影响程度的比值为 $B_1 : B_2 : B_3 = 3\tau_n : 1 : 2$ 。计算判断矩阵 B 最大特征值 λ_{max} 与最大特征值对应的特征向量 W 以确定元素重要性次序的权重值。

$$B \cdot W = \lambda_{max} W \quad (3)$$

式中: λ_{max} 为矩阵的最大特征值。计算得特征向量后,判断矩阵需进行一致性检验,定义为:

$$CR = \frac{CI}{R} = \frac{\lambda_{max} - N}{RI(N-1)} \quad (4)$$

其中 N 为矩阵维数。当 $CR < 0.1$ 时,满足一致性条件,当 $CR \geq 0.1$ 时,认为判断矩阵的一致性不符合要求,需要重新构造矩阵。同样,准则层中各因素分别对应子准则层,分别构造平滑性、经济性和便捷性判断矩阵。在判断矩阵中,本文判断子准则层中五种因素:路径点数、空间均衡度、倒车难度、路径长度和步行距离对于准则层中因素的重要性,根据层次单排序的结果,可得出所有元素和子准则层各元素的权值。基于上述方法最终确定择优目标各项权值为: $\omega_1=0.1761, \omega_2=0.2818, \omega_3=0.1593, \omega_4=0.1945, \omega_5=0.1883$ 。

2.3 最优泊位求解及全局路径生成

将 2.2 中确定的各子目标元素及其权重值代入式(5)中,即可得到如下最终的泊位择优系统目标。

$$\min J_k = \omega_1 C_{k1} + \omega_2 C_{k2} + \omega_3 C_{k3} + \omega_4 C_{k4} + \omega_5 C_{k5}$$

若 $P_m = P_n = \dots$, 则

$$\min J = \frac{\sum_{k=1}^i \left(J_k - \frac{\sum_{k=1}^i J_k}{i} \right)^2}{i} \quad (5)$$

此外,对于任意待泊车辆,应满足最优泊位为空位,即满足: $T_{ab} = 0$ 。在确定最优泊位及其相应节点后,利用回旋线连接前后路口节点 A_i 和 A_j ,其余节点间均用直线连接。根据入口坐标 A_n 建立相应引导路径坐标系,入口点为坐标原点。以入口的车辆行驶方向为 y 轴正方向,水平向右为 x 轴正方向。路口节点 A_i 和 A_j 间回旋曲线全长为 L_{ij} , A_m 为回旋曲线上一点,该点的曲率半径为 R_m 。回旋曲线上任意一点至 A_i 的回旋曲线长为 l ,曲率半径为 R_l 。路口处路径满足下列方程:

$$\begin{aligned} (x_{A_n}, y_{A_n}) &= (x_j + (-1)^{q_1+q_2+1} \frac{R_m}{\sqrt{2}}, y_i + (-1)^{q_1} \frac{R_m}{\sqrt{2}}) \\ x_i \rightarrow x_{A_n} \quad R_l l &= R_m \frac{L_{ij}}{2} = M^2 \\ x_{A_n} \rightarrow x_j \quad R_l (L_{ij} - l) &= R_m \frac{L_{ij}}{2} = M^2 \end{aligned} \quad (6)$$

其中:若车辆沿着 y 轴正方向行驶,则 $q_1=0$,相反则 $q_1=1$;若车辆进行右转,则 $q_2=0$,相反则 $q_2=1$ 。

3 泊车路径规划

将停车场的边界点定义为 $A(x_a, y_a)$ 与 $B(x_b, y_b)$ 。泊车路径的起终点为最优泊位节点 $P_m(x_p, y_p)$ 和 $S_4(x_4, y_4)$ 。 $S_3(x_3, y_3)$ 与 $P_m(x_p, y_p)$ 间用回旋线连接, 与 $S_4(x_4, y_4)$ 间用直线相连。 O 为泊车弧形路径的中心, R 为泊车路径的转弯半径。根据停车场实际情况, 各点关系如式7所示。

$$\begin{aligned} (x_p, y_p) &= \left(\frac{x_a + x_b}{2} + R, y_a - \frac{W_r}{2} \right) \\ (x_3, y_3) &= \left(\frac{x_a + x_b}{2}, y_p + R \right) \\ (x_o, y_o) &= \left(\frac{x_a + x_b}{2} + R, y_p + R \right) \end{aligned} \quad (7)$$

其中, 停车场道路宽度为 W_r 。考虑边界碰撞条件, 泊车弧形路径的转弯半径 R 需满足:

$$R \geq R_{\min}, \frac{W}{2} + L_s + OA \leq R \leq \sqrt{R^2 - (L + L_f)^2} - \frac{W}{2} \quad (8)$$

式中: 汽车的主要参数包括车宽 W 、轴距 L 、前悬 l_f 和后悬 l_r ; 泊车最小安全阈值为 L_s ; 车辆的最小转弯半径定义为 R_{\min} , 不发生碰撞的最大转弯半径为 R^* ; OA 为中心至泊位角点 A 的距离。

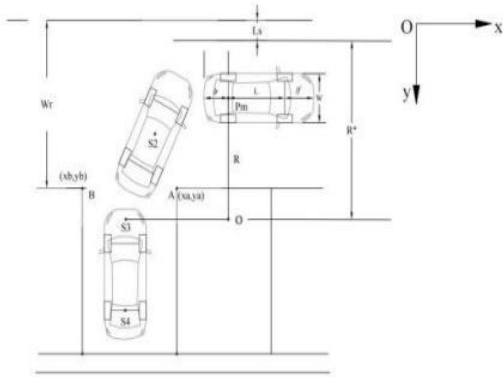


图2 泊位路径规划

Fig.2 Berth path planning

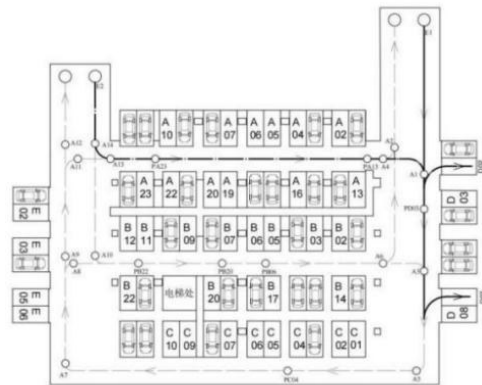
节点 P_m 和节点 S_3 间用回旋线连接, 节点 P_m 和 S_3 处曲率均为0, 定义回旋曲线全长为 L , 回旋线中点为 S_2 , 该点的曲率半径为 R_2 , 至节点 P_m 的回旋曲线长度为 $L/2$ 。 $a = 1/A^2$ 为曲率变化率, 其中 A 为回旋线参数。 R_2 和 $L/2$ 满足等式: $R_2 L/2 = 1/|a|$ 。 两点间的回旋线上有任何一个节点 k 至泊车节点的回旋曲线长度为 l , 曲率半径为 R_k 。 节点 P_m 与 S_3 间的路径满足下列方程:

$$\begin{aligned} x_p \rightarrow x_2 \quad R_k l &= R_2 \frac{L}{2} \\ x_2 \rightarrow x_3 \quad R_k (L - l) &= R_2 \frac{L}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

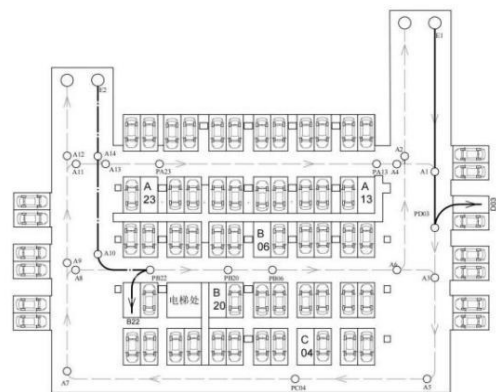
4 仿真分析

本文以双出入口停车场为仿真场景, 共有72个泊位, 分为5个泊车区, 由部分双向车道和部分单向车道组成, 其场内规定通行路线如图3中虚线所示。 本文将目的地均设置为电梯处(B20和B21中间位置)。 泊位长宽分别为5m和3m, 车道宽度为6m。 车辆长度为4.8m, 宽度为2m。 假设同一时刻, 车辆1从入口1处进入停车场, 车辆2从入口2处进入停车场。 本文在不同饱和

度场景下分别进行仿真。 低饱和度时, 空位数为40, 饱和度为44.4; 高饱和度时, 空位数为7, 饱和度为90.3。



(a) 低饱和度场景



(b) 高饱和度场景

图3 校停车场平面图

Fig.3 Campus parking lot

最终的目标泊位结果和相关计算数据如表1所示。由表可见,在停车场不同饱和度的情况下,该方法能够考虑多个车辆的综合泊车效益,可以很好地为多个车辆同时分配合理的泊位,规划合适的全局泊车路径。图3中直线和点画线分别为车辆1和车辆2的全局泊车路径结果。

表1 不同饱和度场景下的多车泊车规划结果

Tab.1 Multi-vehicle parking planning results for different saturation scenarios

泊位分配方案	车辆	泊位编号	归一化后J值	节点编号
低饱和度	车辆1	PD07	0.009 477 957	E1→A1→A3→PD07
	车辆2	PD02	0.007 771 665	E2→A14→A13→A4→A1→PD02
高饱和度	车辆1	PD03	0.053 275 080	E1→A1→PD03
	车辆2	PB22	0.037 219 810	E2→A14→A10→PB22

5 结语

本文提出一种基于多属性决策的多车自主泊车路径全局规划方法,包括最优泊位分配,引导路径生成和泊车路径规划三个部分。将停车场信息映射至拓扑地图,基于层次分析法构建了目标泊位择优体系,利用直线和回旋曲线构造了全局引导路径和泊车路径。仿真结果表明该方法在停车场不同饱和度下均可为同时进入的车辆分配合理的泊位,实现多车同时泊位择优分配,达到降低泊车整体成本,提高泊车效率的目的。

参考文献:

- [1] KHALID M., WANG K., ASLAM, N, *et al.* From smart parking towards autonomous valet parking: A survey, challenges and future works [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2020, 175: 1.
- [2] 王永胜,罗禹贡,黄晨,等.基于拓扑地图的自主泊车路径协调与优化策略[J].中国公路学报, 2021, 34(1): 177. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.01.016.
WANG Yongsheng, LUO Yugong, HUANG Chen, *et al.* A topological map-based path coordination and optimization strategy for autonomous parking [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(1): 177. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.01.016.
- [3] ZENG D Q, HU Y M, DENG Z W, *et al.* Parking slots allocation for multiple autonomous valet parking vehicles [C]// SAE World Congress Experience. [S.l.], SAE, 2022.
- [4] 梅振宇,项贻强,陈峻,等.停车诱导信息配置优化组合模型与算法[J].哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(10): 163.
MEI Z Y, TIAN Y Q. Optimized combination model and algorithm of parking guidance information configuration [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(10): 163.
- [5] PHAM T N, TSAI M F, NGUYEN D B. *et al.* A cloud-based smart-parking system based on internet-of-things technologies [J]. IEEE Access. 2015, 3: 1581.
- [6] LI B, PEI Y J, WU H, *et al.* MADM-based smart parking guidance algorithm [J]. PLoS ONE, 2017, 12(12): e0188283.
- [7] IOANNOU P. On-street and off-street parking availability prediction using multivariate spatiotemporal models [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(5): 2913.