

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202402122024101974

文章编号:1674-599X(2024)06-0127-08

引用格式: 陈涛, 李成鑫, 赵重阳. 考虑安全和效率的自动驾驶汽车路线规划策略研究[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(6): 127-134.

Citation: CHEN Tao, LI Chengxin, ZHAO Chongyang. Automated vehicle route planning strategies considering safety and efficiency[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(6): 127-134.

考虑安全和效率的自动驾驶汽车路线规划策略研究

陈涛, 李成鑫, 赵重阳

(长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为解决自动驾驶车辆决策过程中路线规划策略单一、适用性较差的问题,提出了一种综合考虑路线安全和效率的自动驾驶车辆路线规划策略。首先,以风险分析理论为基础,结合数字地图提供的道路数据及数据中心提供的历史事故数据,构建用于评价路段安全性的道路安全评估模型。然后,建立车辆在不同道路线形下的车辆动力学模型,求解不同路段上的安全车速,并构建用于评价路段通行效率的路段耗时估算模型。最后,以A*算法为基础,结合道路风险评估模型和路段耗时估算模型,设计了综合成本函数,并利用SUMO构建仿真场景进行仿真试验。结果表明:虽然研究所得策略在规划路线的耗时上相比于传统方法增加了11.1%,但在路线风险方面相较于传统方法却显著降低了56.6%,证明该策略在综合性能上更为全面,具有更好的适用性。

关键词:智能交通;路线规划;寻路算法;规划策略;道路安全;通行时间估算

中图分类号:U463.6

文献标志码:A

Automated vehicle route planning strategies considering safety and efficiency

CHEN Tao, LI Chengxin, ZHAO Chongyang

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To address single route planning strategies and limited applicability in the decision-making process of autonomous vehicles, this study proposes a route planning strategy that accounts for both route safety and efficiency. Initially, leveraging risk analysis theory and integrating road data from digital maps with historical accident data from data centers, the study formulates a road safety assessment model to evaluate the safety of road sections. Subsequently, a vehicle dynamics model is established for diverse road alignments to determine the safe speeds on various road sections, and an estimation model of time taken to pass a road section is developed to assess traffic efficiency. Finally, utilizing the A* algorithm and integrating the road safety assessment model with the time estimation model, this paper devises a comprehensive cost function. Simulation experiments are conducted in SUMO to validate the proposed strategy. The results reveal that although the route planning time increases by 11.1%, the route risk simultaneously decreases by 56.6% in the case of using the proposed strategy compared with the conventional strategy. This indicates that the strategy investigated in this

收稿日期:2024-02-12

基金项目:车路一体智能交通全国重点实验室开放课题(2024-B005);国家自然科学基金面上项目(51978075);四川省交通运输科技项目(2021-ZL-02)

通信作者:陈涛(1974—),男,教授,主要从事交通运输安全、自动驾驶汽车决策控制系统等方面的研究工作。

E-mail:chentao@chd.edu.cn

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

paper exhibits more comprehensive performance and improved applicability.

Key words: intelligent transportation; route planning; path-finding algorithm; planning strategy; road safety; transit time estimation

近年来,智能交通系统作为通信技术、控制技术与人工智能等前沿科技深度融合的综合应用系统,已成为广受关注的研究焦点。其中,自动驾驶作为智能交通系统的重要组成部分,相关技术成为了新的研究热点^[1]。其中,路线规划作为自动驾驶决策模块的一部分,对自动驾驶车辆的行驶安全性和行驶效率有着重要的影响。路线规划依托路径搜索算法,通过确定起点和终点来生成目标路线,并引入了不同的成本条件(可分为基于成本效益、基于喜好、基于最短路线和基于最快路线的规划策略^[2]),路径搜索算法可模拟出不同类型的路线。但单一的成本条件所制定的路线往往难以达到最优状态,基于此,于泉等^[3]提出了基于时间最短、距离最短、拥挤度最低的多目标路径选择模型,并实现了动态路径规划。结果表明:相较于单一目标策略,多目标路径选择策略能显著优化路径规划结果。因此,在自动驾驶环境下,车辆的路线规划策略应当考虑除通行效率外的其他因素,以确保自动驾驶技术的整体性能与用户体验达到最佳状态。

目前的导航系统在路线规划时,主要侧重于考虑通行效率,然而效率最优的路线并不一定是最安全的。事实上,系统所推荐的最快路线在安全性方面可能存在缺陷^[4]。SOHRABI等^[5]通过导航应用程序检验了最短路线的安全性,研究显示,路线的事故风险与道路的几何特征密切相关,该研究提出了一种在规划过程中考虑安全性的系统构架,并强调了在实现系统安全性方面所面临的要求与挑战。赵晓华等^[6]通过对导航数据的分析,探究了道路交叉口风险因素与路口相关属性之间的相关性。研究表明:路口的车道数量、信号相位以及违法监控设施的数量等多种因素均对道路路口的安全性产生了显著影响,这为城市道路的安全规划提供了参考。邓子杰等^[7]提出了车辆路线规划方案,将道路的宽度纳入路线规划的策略中,以确保灾害条件下车辆能够安全高效地通行。吴颖等^[8]分析了危险品运输路径与路段周围环境的关系,综合考虑了路段年平均事故的发生概率和路段等级等因素,并运用多目标遗传算法为货物运输规划出了一条相对安全的路线。KRUMM等^[9]基于历史事故数据,训练

了一个二元分类器来预测车辆发生事故的概率,并将其与寻路算法相结合来规划安全的路线。SAHNOON等^[10]在路线规划过程中纳入了交通安全因素和路线的通行效率,使用历史交通事故数据计算出了各路段的交通事故风险成本。尽管上述研究在特殊场景的路线规划策略中考虑了道路特性或历史事故数据等因素,但尚未对道路环境和历史事故数据进行更深入的研究。同时,在对路线耗时进行估算时,现有研究通常是基于路段的平均车速^[11]或浮动车辆数据进行计算的^[12],计算数据主要来源于路侧的点传感器或区间检测器。一方面,由于车辆行驶速度和行驶时间是路段内的变量,且传感器采样可能存在数据丢失等问题,因此这些数据可能不足以准确地计算出路线耗时^[13];另一方面,浮动车数据采集点具有随机性且易受到信号控制等因素影响,在相同时间段内,浮动车在同一路段的运行数据差异显著,因而推算出的路段耗时存在误差^[14]。基于此,可考虑使用差值进行数据填充用以完善交通检测器收集的数据。SHEN等^[15]将测得的时间平均车速转换为空间平均车速,便于更准确地估算路线用时。VAN-LINT等^[16]提出了一种离线估计路线行程时间的算法,用分段线性车速代替分段恒定车速来估算路线耗时,显著地提高了计算精度。吴黎兵等^[17]结合路段长度、车速、车辆密度等历史数据,提出了一种针对受交通信号控制的车辆行驶时间量化方法,该方法能更准确地反映车辆的行驶状态,从而更精确地估算出路段耗时。LIU等^[18]考虑了不同工况下车辆换道所耗费的时间,并通过分析车辆通过交叉口的速度变化,量化了车辆通过交叉口的时间,以计算耗时成本。闫茂德等^[19]用行驶时的安全车距、道路能见距离和平均车距计算了期望行程时间,建立了一种基于行程时间的最优路径选择算法,试验结果表明:该算法计算出的最优路径与实际经验性路径选择高度吻合,该算法对提高城市快速路网运营效率和智能导航设备研发等具有重要应用价值。

然而,上述的路线耗时估算方法主要适用于稳定交通流,对于在自由流状态下且需结合道路特征的自动驾驶车辆路线耗时估算方法,仍有待进一步

研究。基于此,本文主要对自动驾驶车辆的路线规划策略进行研究,在考虑通行效率的同时,还考虑了自动驾驶车辆的运行安全因素。利用自动驾驶汽车的网联功能可更加准确地感知环境状态,同时结合路段的通行效率与安全性,利用A*算法进行求解。具体而言,基于自动驾驶车辆获得的交通流数据、历史事故和环境信息,建立了道路安全评估模型作为路段的出行安全成本函数。同时,根据自动驾驶车辆在不同道路线形下的安全车速,建立了路段的耗时估算模型作为路段的时间成本函数。最后考虑路线的综合成本,并通过仿真试验验证了策略的有效性。

1 路段安全评估模型

为了提升自动驾驶车辆路线的安全性,本文根据历史事故数据对道路的安全性进行了评估。在风险分析理论的基础上,根据路段的当量事故数量及路段长度计算出风险暴露程度;建立“车-路-行驶环境”的故障树模型,用以计算路段事故发生的可能性;基于路段参考车速、道路限速和路侧环境指数,求解事故严重程度。在这套评估体系中,风险暴露程度、事故发生可能性和事故严重程度分别代表风险函数模型中的暴露性、危险性和脆弱性。

路段安全评估模型可通过输入的道路、车辆和路网行驶环境信息,计算各路段的道路风险指数 F ,如式(1)所示:

$$F = f(E, P, C) \quad (1)$$

式中: E 为车辆的风险暴露程度; P 为事故发生可能性; C 为事故严重程度。

车辆的风险暴露程度与路段发生的事故总数、路段长度以及交通量有关,故利用当量事故率法计算路段风险暴露程度。

通过当量算法可计算出路段 i 在 T 年内的当量事故频数 N_a 及当量事故率 E 。

$$N_a = \sum_{i=1}^n K_i J_i + N \quad (2)$$

式中: J_i 为路段 i 发生各类型事故的次数; K_i 为各事故类型的权重; N 为统计时间段内路段发生的事故总数。

$$E = \frac{N_a}{365 \times 10^{-6} \times TL_i Q_i} \quad (3)$$

式中: T 为统计事故数据的时间跨度; L_i 为路段 i 的长度; Q_i 为路段 i 的年平均日交通量。

事故的发生往往源于车辆、道路或行驶环境这三个子系统中某一或多个子系统的失衡状态。

本文先将公路交通事故模型拆解为多个独立的事件模型进行研究,并针对车辆因素、道路因素和行驶环境因素分别构建导致事故发生的故障树模型。其中,“车辆-道路”“车辆-行驶环境”与“公路单车事故”是逻辑上的“或门”关系,意味着任一子系统的故障都会导致整个系统的失效。由于不同子系统有各自对应的事故诱因,因此这些不同的影响因子之间同样通过“或门”逻辑相互连接。

事故的最终发生可以看作是所有这些独立事件概率的综合体现,通过识别事故的关键影响因素建立故障树,结合道路历史事故数据,统计出每个事件对应的事故数量占总事故数的比例,根据最小割集理论计算事故发生的可能性 P :

$$P = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - p_i) \quad (4)$$

式中: k 为最小割集总数; p_i 为每个事件对应的事故数量占总事故数的比例。

同时路侧环境也是影响事故严重程度的重要因素,良好的路侧环境会给车辆更多的缓冲空间,减小二次事故发生的可能性^[20]。定义事故严重程度为 C ,如式(5)所示:

$$C = K \frac{v_q}{v_d} \quad (5)$$

式中: K 为路侧环境影响程度; v_q 为路段历史平均车速; v_d 为路段最高限速。

根据路肩宽度、边坡坡度、路侧净区距离、固定物密度等因素将路侧危险程度划分为1~7级^[21],其分别对应7个不同安全等级的路侧环境,安全等级越高,则路侧的危险性越大。

在进行路段安全评估时,需对路段逐个进行分析计算。首先,依据道路交叉口将路网分成 S 个路段,然后,根据路段分段原则将每个路段分为 i 个子路段,则路段 i 的风险指数可被定义为:

$$F_i = \sum_{j=1}^m w_n e_i p_i c_i \quad (6)$$

式中: F_i 为路段 i 的风险指数; w_n 为车型权重,即为该车型的年平均日交通量与所有车型的年平均日交通量之比; m 为车辆类型总数; e_i 、 p_i 、 c_i 分别为归一化处理后的路段 i 的风险暴露程度、事故发生可能性、事故严重程度, e_i 、 p_i 、 $c_i \in (0, 1)$ 。

在获取路段安全评估模型输入参数方面,路段当量事故数计算和事故基础概率计算所需的路段历史事故参数可以从交通安全管理部门获取;车辆

状态参数主要对应车辆的车型参数和行驶速度信息;道路条件参数主要对应道路线形、曲率和坡度等道路信息,可以根据电子地图获取。

2 路段耗时估算模型

路段耗时估算是根据路段线形求解参考车速并进行路段耗时估算的过程。首先,建立车辆动力学模型,依据横向稳定性原则求解自动驾驶车辆在不同道路线形下的安全车速,并基于安全车速设计出不同道路线形下的速度曲线。然后,根据行驶安全性和乘坐舒适性的标准,对速度曲线的各项参数范围进行限定,并结合运动学原理建立不同道路线形下路段耗时和速度曲线之间的关系。

2.1 不同道路线形下的安全车速

车辆在道路上行驶时的通行时间主要受三个因素的影响:物理因素、交通因素及环境因素。其中,交通因素可划分为自由流状态和非自由流状态下的交通因素,自由流状态下车流密度低,车辆的行驶速度较快,车辆间的直接相互作用较小。非自由流状态下的通行时间主要受交通因素的制约。针对非自由流状态下的路段耗时估算问题,目前已有多种成熟的估算方法。本文聚焦于自动驾驶车辆在自由流状态下的路段耗时估算问题。因此,对于自动驾驶车辆而言,在自由流状态下路线耗时的主要影响因素是物理因素和环境因素,具体为道路线形、车辆性能等。

为了更加准确地进行路线规划,避免单个路段上出现不同道路线形组合的情况,根据《公路项目安全性评价规范》(JTG B05—2015),以路网的交叉口为节点将各路段划分为更为精准的子路段。路段划分准则见表1。

表1 路段划分准则

Table 1 Division criteria of road sections

纵断面	平面	
	圆曲线半径>1 000 m	圆曲线半径≤1 000 m
坡度<3%	平直路段	平曲线路段
坡度≥3%	纵坡路段	弯坡组合路段

由于弯坡路段考虑了纵向坡度因素,相比于平曲线路段更加复杂,因此以弯坡路段为例,通过建立车辆动力学模型,分析车辆的侧向稳定性,并分别求解在平曲线和弯坡路段上的安全车速。车辆在超高路段上的运动受力状态如图1所示。

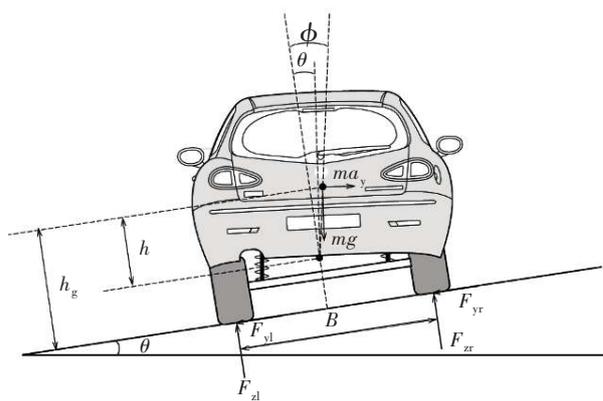


图1 超高路段上车辆的运动受力状态

Fig. 1 Motion force state of vehicles on super high road section

车辆在弯道上行驶时,其发生侧翻的临界条件为车辆内侧轮胎受到的地面作用力 $F_{zl} = 0$,此时绕外侧车轮(即车辆的翻转中心)的力矩平衡公式为:

$$F_{zl}B + h_g(ma_y \cos \theta - mg \cos \alpha \sin \theta) - \left(\frac{B}{2} - h \tan \phi\right)(mg \cos \alpha \cos \theta + ma_y \sin \theta) = 0 \quad (7)$$

式中: F_{zl} 为内侧车轮受到的地面作用力; B 为轮距; h_g 为车辆重心高度; m 为车辆质量; a_y 为侧向加速度; θ 为超高路段坡度角; α 为道路纵坡; g 为重力加速度; h 为车辆侧倾中心与重心之间的高度差; ϕ 为车辆质心倾角。

整理式(7),可以得到:

$$\frac{a_y}{g} = \frac{\cos \alpha (\tan \theta + u - h/h_g \cdot \tan \phi)}{1 - \tan \theta (u - h/h_g \cdot \tan \phi)} \quad (8)$$

求解式(8),可以得到弯坡路段车辆侧翻的临界速度 v_r 为:

$$v_r = \sqrt{gR \cos \alpha \frac{u + E - h/h_g \cdot \tan \phi}{1 - u \cdot E + E \cdot h/h_g \cdot \tan \phi}} \quad (9)$$

$$\phi = \frac{1}{K_\phi/m_s g h - 1} \quad (10)$$

式中: $E = \tan \theta$; R 为弯道半径; u 为横向力系数, $u = B/2h_g$; m_s 为簧载质量; K_ϕ 为悬架系统侧倾刚度。

在超高道路上的车辆内外侧横向受力 F_{yl} 、 F_{yr} 以及地面对车辆的法向力 F_z 为:

$$F_{yl} + F_{yr} = ma_y \cos \theta - mg \cos \alpha \sin \theta \quad (11)$$

$$F_z = mg \cos \alpha \cos \theta + ma_y \sin \theta \quad (12)$$

车辆在弯道行驶过程中,当车轮所受的横向力小于路面与轮胎之间的横向摩擦力时,则会产生侧滑,即侧滑的临界条件为:

$$F_{yl} + F_{yr} = \varphi_y F_z \quad (13)$$

式中: φ_y 为侧向摩擦指数。

联合式(11)~(13)可以得到:

$$a_y = g \frac{\varphi_y \cos \alpha \cos \theta + \cos \alpha \sin \theta}{\cos \theta - \varphi_y \sin \theta} \quad (14)$$

求解式(14)得到弯坡路段车辆侧翻的临界速度 v_s 为:

$$v_s = \sqrt{gR \cos \alpha \frac{\varphi_y + E}{1 - \varphi_y E}} \quad (15)$$

即车辆在弯坡路段行驶时的安全车速为:

$$v_{safe} = \min \{ v_s, v_r \} \quad (16)$$

由于平直路段和纵坡路段都具备良好的道路条件,此时限制自动驾驶车辆行驶速度的主要因素为交通状态和道路限速。

2.2 路段耗时估算模型

根据道路线形和工况的差异,路段的速度估计曲线可以被细分为四个组成部分,每一部分均对应一个基本速度曲线模型。具体而言,这四个组成部分为:平曲线路段、平直路段、弯坡路段结合上坡路段、下坡路段。以一条包含所有线形的路线为例,路段速度曲线如图2所示。

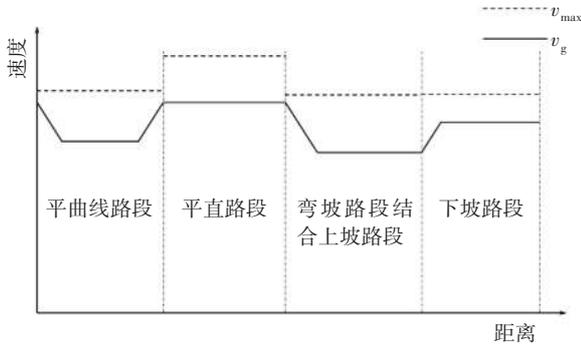


图2 路段速度曲线

Fig. 2 Velocity curve on section

在平曲线路段行驶时,车辆以初始速度 v_0 驶入弯道并减速至估计速度 v_g ,而后保持该速度行驶,在出弯道时适当提速。为满足乘坐舒适性要求,设加速度与减速度 $a = 0.6a_{max}$,估计速度 $v_g = 0.8v_{safe}$,则车辆在长度为 L_1 的平曲线路段上的行驶时间 T_1 为:

$$T_1 = 2 \frac{v_0 - v_g}{a} + \frac{L_1 - (v_0^2 - v_g^2)/2a}{v_g} \quad (17)$$

在弯坡路段结合上坡路段行驶时,车辆以初始速度 v_0 驶入路段并减速至 v_g ,然后保持匀速行驶通过路段,则车辆在长度 L_2 的弯坡结合上坡路段上的行驶时间 T_2 为:

$$T_2 = \frac{v_0 - v_g}{a} + \frac{L_2 - (v_0^2 - v_g^2)/2a}{v_g} \quad (18)$$

在下坡路段行驶时,若不采取纵向控制措施,

车辆本身的速度会呈增加趋势,当车辆以初始速度 v_0 加速到 v_g 后匀速行驶,则车辆在长度为 L_3 的下坡路段上的行驶时间 T_3 为:

$$T_3 = \frac{v_g - v_0}{a} + \frac{L_3 - (v_g^2 - v_0^2)/2a}{v_g} \quad (19)$$

在平直路段行驶时,车辆保持匀速行驶,车速为 v_g ,则车辆在长度为 L_4 的下坡路段上的行驶时间 T_4 为:

$$T_4 = \frac{L_4}{v_g} \quad (20)$$

3 路线规划策略

路线规划的基本思想是:在保证行驶安全和效率的前提下,基于自动驾驶车辆获得的多种信息,选择一条从起点至终点的最优路径。路线规划最早起源于移动机器人领域,且形成了图搜索、采样、智能算法等多种技术手段,并逐渐应用于车辆路线规划研究中用以应对复杂道路网络下的最优路径决策问题^[22]。其中,A*算法作为一种高效的图搜索算法,通过引用启发式函数来进行路径搜索,特别适用于全局环境信息中已知路径的规划。相较于基于采样的算法,A*算法更易于寻得全局最优解;相比于经典的Dijkstra算法,A*算法更具有启发性且搜索速度较快。但当地图较大时,A*算法耗时较长。综合考量算法的各项性能,本文最终选择A*算法作为路线规划算法。

传统A*算法的核心函数为:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (21)$$

式中: $f(n)$ 为总移动代价; $g(n)$ 表示从起始点到当前搜索点的实际代价; $h(n)$ 表示当前搜索点距离目标节点的估算代价。使用估算代价 $h(n)$ 是因为从当前搜索点到目标节点的路径仍然未知。也正是 $h(n)$ 的存在,才使得A*算法具有启发性。

考虑路段的安全性和行驶效率,本文提出了一种考虑路段综合成本的路线规划策略对A*算法的成本函数进行改进,改进后的函数为:

$$f(n) = g_s(n) + h_s(n) \quad (22)$$

式中: $g_s(n)$ 表示从起始点到当前搜索点的实际代价,其值用路段的综合成本表示,保障了路线较高的安全性和行驶效率; $h_s(n)$ 表示当前搜索点到目标节点的估算代价,其代价值用欧氏距离表示,保障了路线始终朝着终点的方向进行。 $g_s(n)$ 、 $h_s(n)$ 具体

计算公式为:

$$g_s(n) = \alpha R_i + \beta(T_i + t_s) \quad (23)$$

$$h_s(n) = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad (24)$$

式中: R_i 表示路段风险指数; T_i 表示路段耗时; α 表示路段风险指数权重; β 表示路段耗时权重; t_s 表示路段红灯耗时; x_i, y_i 为节点*i*的横纵坐标; x_{i-1}, y_{i-1} 为节点*i-1*的横纵坐标。路线规划策略流程如图3所示,其中路线规划算法的执行步骤如下:

1) 建立拓扑地图,进行路段划分,并用邻接表储存路网结构及路段的相应数据信息;2) 将起始节点加入 Open 表中,如果 Open 表不为空,则循环执行步骤3~5,否则规划失败;3) 选取 Open 表中*f*(*n*)值最小的节点*n*;4) 如果节点*n*为终点,则搜索结束,返回找到的路径,如果节点*n*不为终点则执行下一步;5) 以节点*n*为中心,将其临近节点加入到 Open 表中,并将节点*n*放入 Close 表中;6) 将 Close 表中的点连接起来,得到规划的路线。

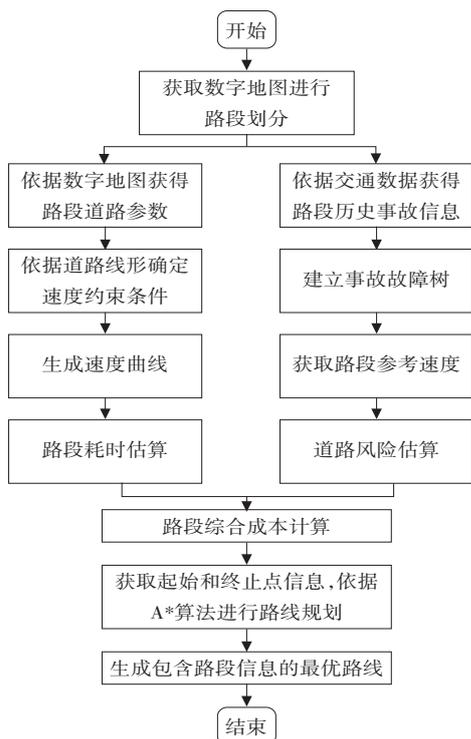


图3 路线规划策略流程图
Fig. 3 Flowchart of route planning strategy

4 仿真试验

4.1 仿真环境

本文利用SUMO软件搭建了如图4(图中编码为路段名称)所示的仿真路网作为验证路线规划策

略的场景,通过SUMO软件的TraCI接口实现了路线规划策略算法。在该仿真试验环境中共设置了41个测试节点和52条测试路段,所有道路均为双向两车道。路网文件包含道路id、交叉口id、位置信息、优先权信息和交通信号信息。其中,每个路段的基本参数包括道路限速、路段曲率、路段坡度以及路侧环境等基本信息,这些信息可用于计算路段的相应成本。

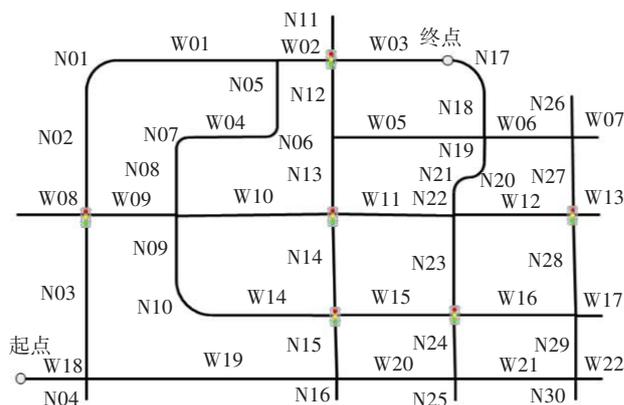


图4 仿真路网

Fig. 4 Simulated road network

路段事故汇总见表2,事故类型可分为追尾、侧翻和侧滑三类,相应权重 K_j ($j = 1, 2, 3$)分别取0.70、0.15和0.15。在进行车辆路线规划时,将考虑并收集所在区域的历史事故数据,这些数据将作为路线规划算法的重要输入,用于计算各路段的风险成本。

表2 路段事故汇总表

Table 2 Summary of accidents on road sections

序号	路段名称	追尾/起	侧翻/起	侧滑/起
1	W01	2	0	0
2	N01	0	2	31
3	N03	16	0	0
4	N07	3	5	38
5	N10	3	6	25
6	N14	0	0	16
7	W06	18	0	0
8	W10	25	0	0
9	W15	15	0	0
10	W19	30	0	0

4.2 仿真结果

在相同的路网环境下,分别对传统路线规划策略(路线1,优先考虑通行效率)和考虑综合成本的路线规划策略(路线2,同时考虑通行效率与安全性,其中路段耗时和安全性的权重系数均为0.5)进行仿真试验,得到两种路线规划策略下的最优路线,如图5所示。

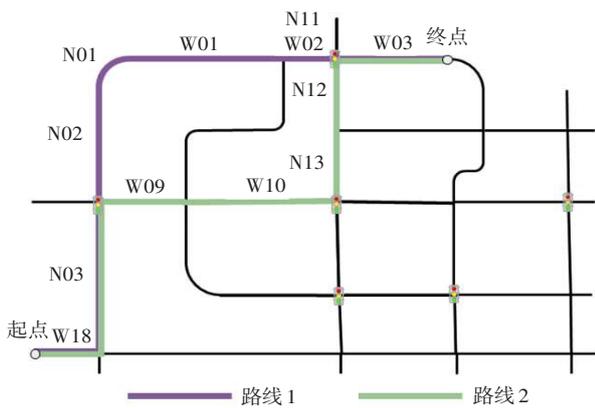


图 5 路线规划结果

Fig. 5 Route planning results

传统路线规划策略的最优路线为路线 1,其耗时成本为 0.177 51;考虑综合成本规划策略的最优路线为路线 2,其综合成本为 0.132 15,各路线的相应成本如表 3 所示。

表 3 路线成本

Table 3 Route travel cost

路线	路段组成	安全成本	耗时成本	综合成本
1	W18-N03-N02-N01-W01-W02-W03	0.154 65	0.177 51	0.166 08
2	W18-N03-W09-W10-N13-N12-W03	0.067 10	0.197 20	0.132 15

从路线规划的仿真结果可以得出:出发地与目的地之间各路线的成本存在显著差异,相比于传统路线,综合成本最小的路线耗时成本增加了 11.1%,但路线风险指数减小了 56.6%。“N01”“N20”“N21”“W04”等路段通行效率虽然较高,但潜在的事故风险较大,不利于自动驾驶车辆的安全行驶,考虑综合成本的路线规划策略的最优路线有效地避开了这些路段。仿真结果进一步证明了本文所提出的路线规划策略的有效性,该策略不仅可以满足自动驾驶车辆出行需求的多样性,还能规划出一条既降低行驶风险又保持高效率的路线。

5 结论

1) 以自动驾驶车辆为研究对象,针对路线规划策略的单一性和适用性问题,设计考虑路线耗时和安全性的综合成本函数,结合 A*算法建立了一种优化的路线规划策略。

2) 仿真结果表明:利用能够获取到的历史数据

及道路信息,本文提出的自动驾驶车辆路线规划策略能够找到一条安全且高效的路线。与单一的效率优先规划策略相比,本文提出的路线规划策略能够有效地避开事故多发路段,并同时考虑路线的通行效率,适应性更好。

3) 在对自动驾驶车辆进行路线规划时,本文提出的策略可以考虑到更多的道路历史数据及环境信息,规划策略更为全面。目前,国内外对于车辆路线规划策略的成本研究多注重于传统车辆的导航方面,不适用于自动驾驶车辆,且此类策略考虑的成本较为单一,因此本文的研究具有一定的实际运用价值。

在提高路线安全性方面,本文主要根据道路历史事故数据进行风险计算。在后续的研究中,应考虑采用宏观层面和微观层面相结合的道路风险因子计算方式,例如结合交通环境、自身车辆状态等信息计算出即将行驶路段的实时路线风险因子,共同形成更加准确的风险因子计算模型,进一步提高路线规划策略的安全性。

参考文献(References):

[1] 赵娜,王旭东,雷聪聪. 国内外智能交通系统研究热点及演化趋势分析[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(5): 122-138. DOI: 10.16544/j. cnki. cn43-1494/u2022051723051997.

ZHAO Na, WANG Xudong, LEI Congcong. Analysis of research hotspots and evolutionary trends of intelligent transportation systems at home and abroad[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39(5): 122-138. DOI: 10.16544/j. cnki. cn43-1494/u.2022051723051997.

[2] SINGH R K, KUMAR M. Route guidance system for the road network: a review [J]. Wireless Personal Communications, 2021, 119(2): 1161-1177. DOI: 10.1007/s11277-021-08255-z.

[3] 于泉,姚宗含. 动态重规划的多目标路径产生方法研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2019, 17(4): 105-112. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4747.2019.04.015.

YU Quan, YAO Zonghan. Research on a multi-objective path generation method for dynamic replanning [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2019, 17(4): 105-112. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-4747.2019.04.015.

[4] ZUO L, GUO Q, XU X, et al. A hierarchical path planning approach based on A* and least-squares policy iteration for mobile robots [J]. Neurocomputing, 2015, 170: 257-266. DOI: 10.1016/j.neucom.2014.09.092.

[5] SOHRABI S, LORD D. Navigating to safety: necessity, requirements, and barriers to considering safety in route finding [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 137: 103542. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103542.

- [6] 赵晓华, 姚莹, 丁阳, 等. 基于导航数据的交叉口进口道安全风险评估及诊断方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(12): 1733-1741.
ZHAO Xiaohua, YAO Ying, DING Yang, et al. Navigation-data-based risk evaluation method at intersection entrance [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(12): 1733-1741.
- [7] 邓子杰, 曾传华, 柴李, 等. 灾害情况下基于改进蚁群算法的救援车辆路径优化[J]. 公路与汽运, 2022(4): 33-38. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2022.04.009.
DENG Zijie, ZENG Chuanhua, CHAI Li, et al. Path optimization of rescue vehicles based on improved ant colony algorithm in disaster situation [J]. Highways & Automotive Applications, 2022 (4): 33-38. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2022.04.009.
- [8] 吴颖, 程赐胜. 易燃易爆物品道路运输路径选择问题研究[J]. 交通科学与工程, 2009, 25(4): 97-102. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2009.04.005.
WU Ying, CHENG Cisheng. Study on transportation route choice for flammable and explosive dangerous goods[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2009, 25(4): 97-102. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2009.04.005.
- [9] KRUMM J, HORVITZ E. Risk-aware planning: methods and case study on safe driving route [J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2017, 31(2): 4708-4714. DOI: 10.1609/aaai.v31i2.19099.
- [10] SAHNOON I, SHAWKY M, AL-GHAFLI A. Integrating traffic safety in vehicle routing solution [C]// Proceedings of the AHFE 2017 International Conference on Human Factors in Transportation. California: Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2018: 251-263.
- [11] 张和生, 张毅, 胡东成. 路段平均行程时间估计方法[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(1): 89-96. DOI: 10.3321/j.issn: 1671-1637.2008.01.018.
ZHANG Hesheng, ZHANG Yi, HU Dongcheng. Estimation method of average travel time for road sections [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(1): 89-96. DOI: 10.3321/j.issn: 1671-1637.2008.01.018.
- [12] 罗霞, 曹阳, 刘博, 等. 基于浮动车数据的城市道路行程时间估计[J]. 交通运输工程与信息学报, 2018, 16(2): 1-8. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4747.2018.02.001.
LUO Xia, CAO Yang, LIU Bo, et al. Travel time estimation for urban roads based on floating car data [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2018, 16(2): 1-8. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4747.2018.02.001.
- [13] MORI U, MENDIBURU A, ÁLVAREZ M, et al. A review of travel time estimation and forecasting for Advanced Traveller Information Systems [J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2015, 11(2): 119-157. DOI: 10.1080/23249935.2014.932469.
- [14] 秦玲, 张剑飞, 郭鹏, 等. 浮动车交通信息采集与处理关键技术及其应用研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(1): 39-42. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2007.01.006.
QIN Ling, ZHANG Jianfei, GUO Peng, et al. Study of key technologies and applications of floating car traffic information collection and processing [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 7(1): 39-42. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2007.01.006.
- [15] SHEN L O, HADI M. Practical approach for travel time estimation from point traffic detector data [J]. Journal of Advanced Transportation, 2013, 47(5): 526-535. DOI: 10.1002/atr.180.
- [16] VAN-LINT J W C, VAN-DER-ZIJP N J. Improving a travel-time estimation algorithm by using dual loop detectors [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2003, 1855(1): 41-48. DOI: 10.3141/1855-05.
- [17] 吴黎兵, 范静, 聂雷, 等. 一种车联网环境下的城市车辆协同选路方法[J]. 计算机学报, 2017, 40(7): 1600-1613. DOI: 10.11897/SP.J.1016.2017.01600.
WU Libing, FAN Jing, NIE Lei, et al. A collaborative routing method with internet of vehicles for city cars [J]. Chinese Journal of Computers, 2017, 40(7): 1600-1613. DOI: 10.11897/SP.J.1016.2017.01600.
- [18] LIU C R, JIANG K, XIAO Z Y, et al. Lane-level route planning based on a multi-layer map model [C]//2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Yokohama: Japan. IEEE, 2017.
- [19] 闫茂德, 常楠楠, 张昌利. 城市快速路网行程时间计算与最优路径选择算法[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(5): 811-816. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2014.05.011.
YAN Maode, CHANG Nannan, ZHANG Changli. Travel time computation and optimal path selection algorithm of urban expressway network [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(5): 811-816. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2014.05.011.
- [20] 游克思, 孙璐, 顾文钧. 基于车辆动力学仿真模拟和风险分析的道路危险路段识别[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(1): 150-155. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2012.01.028.
YOU Kesi, SUN Lu, GU Wenjun. Risk analysis-based identification of road hazard locations using vehicle dynamic simulation [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(1): 150-155. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2012.01.028.
- [21] ZEGER C V, REINFURT D W, HUMMER J, et al. Safety effects of cross-section design for two-lane roads [J]. Transportation Research Record, 1988(1195): 20-32.
- [22] 马昌喜, 郝威, 沈金星, 等. 定制公交线路优化综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(5): 30-41. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.05.003.
MA Changxi, HAO Wei, SHEN Jinxing, et al. Review on customized bus route optimization [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(5): 30-41. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.05.003.

(责任编辑:薛仪)