

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.060

基于十字路口交通流场景的自动驾驶客车速度控制

廖亚兵

(中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122)

摘要:针对车辆在十字路口与对面车辆存在潜在的碰撞风险,提出一种基于估算速度的控制方法。搭建仿真环境进行多次测试,对测试数据进行单因素方差分析。结果表明:所提方法可以预测对面车辆的未来轨迹和碰撞时间,并优化自车的行驶速度,从而有效降低了碰撞风险。

关键词:十字路口;交通流;自动驾驶客车;速度控制

中图分类号:U461.91 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)01-0295-06

Speed Control of Self-driving Bus Based on Intersection Traffic Flow Scenario

LIAO Yabing

(China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract: This paper proposes an estimation-based speed control method aiming at the potential vehicle collisions with the vehicle from the opposite at the intersection. A simulation environment was built and multiple tests were carried out. One-way analysis of variance was performed on the test data. The results show that the proposed method can predict the future trajectory and collision time of the opposite vehicle, optimize the driving speed of the vehicle and effectively reduce collision risk.

Keywords: crossroads; traffic flow; self-driving bus; speed control

0 引言

自动驾驶发展至今,如何确保自动驾驶车辆在与周围交通流交互时的安全性仍然是最具挑战性的问题之一。因为现实世界的情况各不相同,存在很大的不确定性。自动驾驶车辆需要准确、稳定地处理复杂环境,特别针对包含十字路口在内的城市交通场景^[1]。据统计,交通流融合场景中,与对面车辆的碰撞在交通事故中占很大比例,自动驾驶车辆应当在十字路口场景下也能保障此类工况的行车安全性。

本文主要讨论的场景为当自动驾驶车辆接近十字路口时,对面的车辆可能会试图向右转弯,并越过自动驾驶车辆的行车路线(右侧驾驶)。对于自车来说,可以用图像识别加处理的方法^[2]对对面车辆的转向灯进行检测,但识别难度高,精度无法保证,容易被当作失真信号处理。如果自车无法判断对面车辆的行车轨迹时,应适当控制车速以避免碰撞。此外,在十字路口如果对面车道的车辆驾驶员具有侵略性驾驶风格、或者未注意到其他车辆等情况下,对面车辆的驾驶员为了避免与自车碰撞可能进行危险转向动作。尽管改变

车道或转向可以使自车避免潜在的碰撞,但有时交通状况不允许对面车道的车辆采取这类动作(比如,有其他车辆在相邻车道等待右转或U型转弯的车辆可能会占据换道的空间)。对此自车会产生两种决策:1)在停止线前减速给对面车辆让路;2)在不转向的情况下,安全越过对面车辆通过十字路口直行。

上述讨论的问题可以被看作是一项决策任务。控制系统需要在考虑周围交通环境的同时,确定车辆的适当速度。这类问题的解决方法之一是将车辆行驶任务描述为 POMDP(部分可观测马尔可夫决策过程)。该模型将自动驾驶视为一个状态转换过程,对过程中可能发生的事件比如到达停车线、与其他车辆发生碰撞等设置奖惩值,然后,求解器通过值迭代或策略迭代^[3-4],在每个状态下进行一定的动作,找到最终能获得最大回报的最优策略。与马尔可夫决策过程相比,该算法考虑了不可观测变量,利用置信树估计真实状态,更适合解决本文提出的问题。然而,由于状态维度和历史数据增量会产生较大的计算负荷,运用在线 POMDP 求解器时需要消耗大量的计算资源,很难被应用于包括交叉口在内的复杂城市交

作者简介:廖亚兵(1985—),男,湖北天门人,工程师,本科,研究方向为汽车主动安全、汽车整车性能测试等,grapefruit_boy@163.com。

通环境中^[5-6]。

另一种解决本文问题的思路是使用车辆的当前位置和相对速度来估计它们到达潜在碰撞危险区域的时间,然后规定自车和对面车辆通过交叉路口的行车顺序,发出相关指令避免发生两车碰撞。根据指令,自车可以进行加速或停止^[7]。同时,与 POMDP 相比,由于相对速度碰撞计算方法^[8]在结构上更加清晰简洁,故本文采用这种方法来计算车辆碰撞的速度问题。此外,由于人类驾驶员的意图无法直接测量,对面车辆的未来运动是未知的,需要对其未来的轨迹和速度进行可靠的预测。

综上所述,对于自动驾驶车辆来说,在十字路口如何避免其与对面车辆发生潜在的碰撞是一个关键问题,为此本文提出一种计算对面车辆未来轨迹和碰撞时间的方法。该方法通过生成的碰撞时间来优化自车的行驶速度。通过对测试集数据的统计分析表明该方法可以降低自车和对面来车发生碰撞的概率及无法避免碰撞时的碰撞速度。

1 数学建模及分析

如图 1 所示,在十字路口交叉交通流场景中,自车为中型客车,以速度 v_0 直行通过有 4 条车道的十字路口,同时对面车辆则有可能右转。对面车辆可能的状态包括:1) 在右转停车线等待;2) 靠近停车线。对面车辆右转的时间和未来轨迹是未知的。自车将不采取横向转向方式,只允许减速或加速,以避免碰撞。如果碰撞在某些情况下是不可避免的,自车将通过减速以降低碰撞速度,来最大限度地减少碰撞损害。

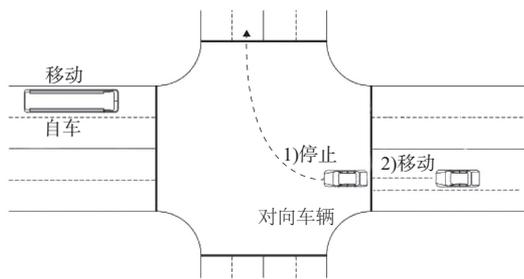


图 1 十字交叉口场景描述

EBSC 的主要思想是预测交叉路口其他车辆的运动。首先,将对面车辆的预测轨迹与自车的规划轨迹重叠,找到潜在碰撞点。然后,假设对面车辆的速度基本稳定,考虑合理的速度偏差,计算得到本车和对面车辆到达碰撞点的时间。最后,

通过对比到达这些碰撞点的时间,自车系统将做出在对面车辆之前或之后通过交叉路口的决策。根据确定通过交叉路口的顺序,自车系统将给出最优车速以避免潜在的碰撞。

对面车辆的未来运动路线由其速度和轨迹决定。对面车辆的速度主要由激光雷达传感器数据获取。如图 2 所示,当前实车前方放置了 3 个雷达传感器。雷达 1 和雷达 3 是两台某公司生产的 FX-10 激光雷达,最大水平探测距离为 15 m。雷达 2 为 Velodyne VLP-16 激光雷达,最大水平探测距离为 100 m。3 个激光雷达都可以覆盖 60° 的探测区域,3 个激光雷达传感器都用于观察周围环境和其他交通参与者的运动。通过对这 3 个激光雷达传感器获取的数据运行跟踪算法,可以得到对面车辆的速度。在碰撞时间计算过程中,需要从激光雷达传感器数据中获得对面车辆的速度 v_0 。

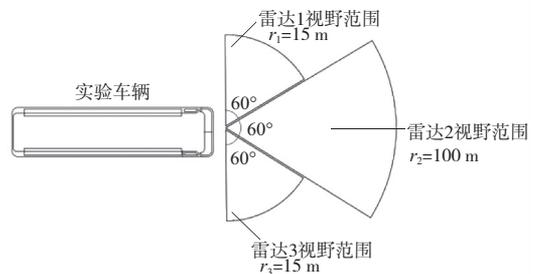


图 2 实车前激光雷达传感器

1.1 轨迹计算

本研究使用的车辆模型为图 3 所示的点模型^[9-11]。 Φ 表示车辆状态信息。 Φ 包含车辆中心点 (x, y) 的地理坐标位置和车辆的速度 v 。自车通过 GPS 数据获得自身的地理坐标位置,通过雷达传感器可以获得对面车辆的相对坐标位置。随着对面车辆速度 v_0 的变化,可以得到对面车辆的状态信息 Φ_0 。本文用 γ 来定义一段轨迹。对于对面车辆而言, γ 是其沿道路行驶时车辆中心点的集合。 γ 包含一个起始点 (x_i, y_i) 和一个终点 (x_e, y_e) 。

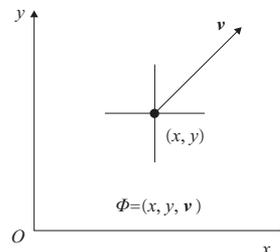


图 3 车辆状态信息

由于未来轨迹会因人类驾驶员的驾驶行为和环境因素而发生显著变化,因此从既存信息中无法推断出对面车辆准确的未来运动轨迹 γ 。

本文提出了一种方法,假定十字路口内转弯曲线的几何形状基本由回旋线组成,并对包含所有可能轨迹的面积进行大规模计算,形成对面车辆行驶轨迹簇^[12]。

回旋线是以曲率 k 为变量的螺旋曲线,曲率 k 与弧长 L 之间呈线性关系,如式(1)所示。

$$L = kA^2 + c_0 \quad (1)$$

式中: A 为常系数; c_0 为常系数^[13]。

基于回旋线方程,坐标 x 和 y 的值通过积分计算:

$$x = A \int_0^L \cos \frac{l^2}{2} dl \quad (2)$$

$$y = A \int_0^L \sin \frac{l^2}{2} dl \quad (3)$$

基于交叉口物理结构和常见的驾驶行为,交叉口内部转弯曲线形状可以采用回旋线来近似拟合对面车辆的未来轨迹,如图4所示。

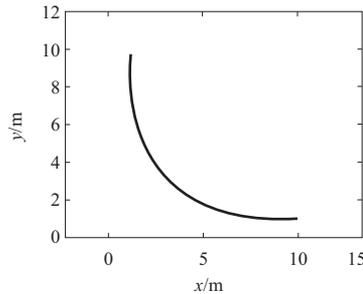


图4 坐标系中的回旋线表示

如前文所述,计算对面车辆所有可能轨迹所存在的区域。假设所有可能的轨迹回旋线形状都具有相同常数 c_0 但系数 A 不同,它们在对面车道共用一个起始点 (x_i, y_i) ,对面车辆进行右转动作如图5所示。

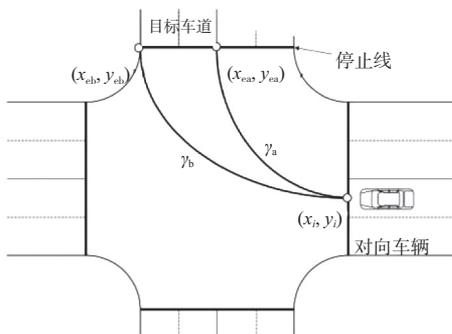


图5 轨迹存在区域估计

为了确定对面车辆行驶轨迹区域,离线生成了两个边界线 γ_a 和 γ_b 。在所有的回旋线轨迹中, γ_a 的长度最小,回旋线系数 A_a 最小。此外, γ_a 的终点 (x_{ca}, y_{ca}) 位于对面车辆可能驶入的车道的最右侧。相反, γ_b 具有最大长度和最大回旋线系数 A_b , γ_b 的终点 (x_{cb}, y_{cb}) 位于最左边。假设对面车辆所有可能的轨迹都位于图5上方的3条线 γ_b 、 γ_a 和目标车道停止线所包围的区域内。

1.2 计算碰撞时间

将对面车辆的行车区域与自车的规划轨迹重叠得到潜在碰撞区域。

假设交叉口内对面车辆的速度 v_o 基本稳定,对时间碰撞边界进行估计,初始碰撞边界(如图6中“估计碰撞边界A”)发生在对面车辆选择长度最小的轨迹 γ_a 时,最终碰撞边界(如图6中“估计碰撞边界B”)发生在对面车辆选择长度最大的轨迹 γ_b 时。对面车辆行车轨迹和自车规划轨迹的重叠点称为碰撞点。 γ_a 上的碰撞点是 (x_{ca}, y_{ca}) , γ_b 上的碰撞点是 (x_{cb}, y_{cb}) 。

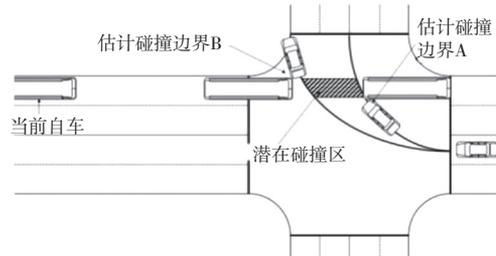


图6 潜在碰撞区域估计

当雷达获得对面车辆的状态信息 Φ_o 时,计算出碰撞时间 t_c ,即距离当前时间 t_c s 后可能发生碰撞。根据 Φ_o ,有两种不同的情况:对面的车辆在十字路口内部时被探测到或者对面的车辆在十字路口外部被探测到。碰撞时间 t_c 的计算在两种情况下是不同的。如图7(a)所示,当对面车辆在路口外时,可知 t_c 大于等于其从当前位置 (x_o, y_o) 移动到碰撞点 (x_{ca}, y_{ca}) 所消耗的时间, t_c 小于等于移动到碰撞点 (x_{cb}, y_{cb}) 所消耗的时间。如式(4)所示。

$$\frac{l_a + l_b}{v_o} \leq t_c \leq \frac{l_b + l_d}{v_o} \quad (4)$$

式中: l_a 为起始轨迹点 (x_i, y_i) 到碰撞点 (x_{ca}, y_{ca}) 的长度; l_b 为起始轨迹点 (x_i, y_i) 到 (x_{cb}, y_{cb}) 的轨迹长度; l_d 为对面车辆当前位置 (x_o, y_o) 到 (x_i, y_i) 的线性距离; v_o 为雷达观测到的对面车辆的速度。

如图 7 (b) 所示,当发现对面车辆在十字路口内时,采用另一种计算方法。由于对面车辆的未来轨迹未知,使用 γ_b 和 γ_a 上的参考位置来近似其当前位置到碰撞区域的距离。首先,以对面车辆为对象,建立垂直于速度矢量的参考线。然后,参考线和轨迹 γ_a 在点 (x_{ma}, y_{ma}) 相交、参考线和轨迹 γ_b 在点 (x_{mb}, y_{mb}) 。此时,对面车辆当前位置到碰撞区域的行驶轨迹长度大于等于 γ_a 上从 (x_{ca}, y_{ca}) 到 (x_{ma}, y_{ma}) 的曲线长度,记为 l_{mca} 。同理可知,对面车辆当前位置到碰撞区域的行驶轨迹长度小于等于 γ_b 上从 (x_{cb}, y_{cb}) 到 (x_{mb}, y_{mb}) 的曲线长度,记为 l_{mcb} 。这种情况下的 t_c 计算表达式如下:

$$\frac{l_{mca}}{v_o} \leq t_c \leq \frac{l_{mcb}}{v_o} \quad (5)$$

在这种情况下,有时对面车辆会行驶到计算的轨迹区域之外,在存在估计误差的情况下,仍然会对碰撞时间进行计算。这个误差会在接下来的速度控制中予以考虑。

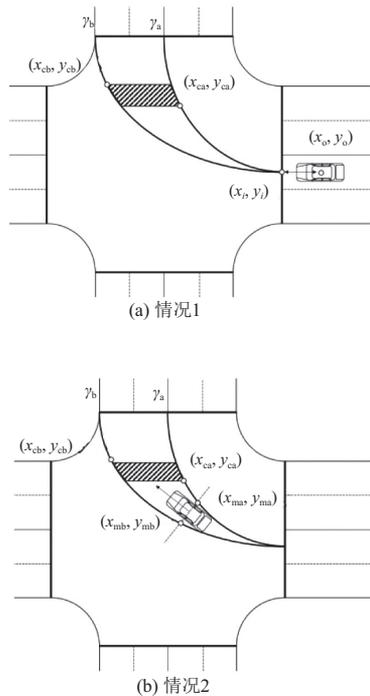


图 7 两种不同情况下的碰撞时间计算

1.3 自车的速度控制

为了避免碰撞,自车有两种选择:1) 在对面车辆到达之前驶出潜在的碰撞区域;2) 减速或者在对面车辆离开潜在碰撞区域通过交叉路口。为实现第 1) 种选择,自车速度 v_e 应满足如下约束:

$$\begin{cases} v_e > \frac{v_o \cdot d_{ca}}{l_a + l_d} \\ v_e > \frac{v_o \cdot d_{ca}}{l_{mca}} \end{cases} \quad (6)$$

式中 d_{ca} 表示从自车中心点 (x_{ego}, y_{ego}) 到碰撞点 (x_{ca}, y_{ca}) 的横向距离。简而言之,在这两种情况下,都将方程右边的速度约束记为 v_a 。

同理,为实现第 2) 种选择,自车速度 v_e 应该满足如下约束:

$$\begin{cases} v_e > \frac{v_o \cdot d_{cb}}{l_b + l_d} \\ v_e > \frac{v_o \cdot d_{cb}}{l_{mcb}} \end{cases} \quad (7)$$

式中 d_{cb} 为自车中心点到碰撞点 (x_{cb}, y_{cb}) 的横向距离。在这两种情况下,都将方程右边的速度约束记为 v_b 。

由于两辆车的状态信息 Φ 不断变化, v_a 和 v_b 会实时更新。但是,当自车或对面车辆安全驶出潜在碰撞区域后,意味着未来将不再发生碰撞,此时停止更新 v_a 和 v_b 的数值,自车恢复正常行驶模式。如果自车发现对面车辆在潜在碰撞区域内行驶, v_a 将被设置为最高限速 v_{lim} , 即本车辆不能在对面车辆之前加速通过路口。类似地, v_b 将被设置为 0, 这意味着自车必须让行。

显然,自车的最佳速度应该是高于 v_a 或低于 v_b 的速度 (v_a 总是大于 v_b)。考虑到对对面车辆的轨迹预测和碰撞时间的计算存在一定误差,使用 v_{safe} 来获得对自车更安全的速度限制,如下式所示。

$$\begin{cases} v_e < v_b - v_{safe}, \text{ 自车让行} \\ v_{lim} > v_e > v_a + v_{safe}, \text{ 自车首先通过} \end{cases} \quad (8)$$

式中: v_{lim} 是前面提到的速度限制; $v_a + v_{safe}$ 被强制设置为小于 v_{lim} 。

1.4 自车速度切换

当雷达传感器检测到对面车辆时,系统开始更新 v_a 和 v_b , v_a 和 v_b 的时间记录示例如图 8 所示。时间轴上的 0 点为检测到对面车辆的时间点。随着时间的增加,自车接近十字路口。为了通过交叉口,自车的速度 v_e 应该从危险速度区 (v_a 和 v_b 之间) 切换到较高的安全速度区 (v_a 以上), 因为保持 v_e 在较低的安全速度区 (v_b 以下) 可以保证在发生碰撞之前停止。

2 构建仿真环境并测试验证

为了检验 EBSC 方法在本文解决所提问题中

的有效性,在仿真软件 V-REP 中创建了相应的仿真场景,考虑到自车和对面车辆的速度变化,设计了 6 组仿真测试工况。

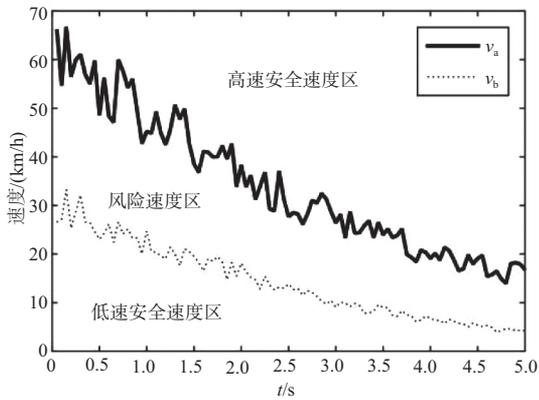


图 8 仿真中 v_a 和 v_b 的记录情况

2.1 构建仿真环境

构建的场景仿真环境如图 9 所示。这是一个典型的四向交叉口,对面车辆和自车作为交通参与者部署到场景中。参照测试实车配置,在仿真车辆前部设置了 3 个激光雷达传感器。图中的细线代表雷达传感器的边界。通过在仿真世界中导入绝对地理位置来模拟 GPS 信号。此外,还加入了微小的随机误差来模拟 GPS 系统在实际中的测量误差。

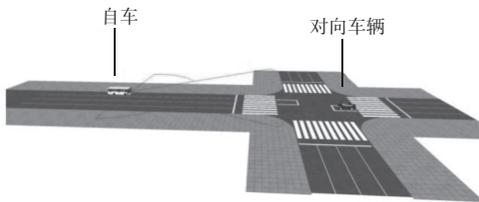


图 9 在 V-REP 中构建的仿真场景

2.2 仿真测试统计

在仿真过程中,对面车辆的右转动作每次都是随机的。在十字路口停车时,随时都可能突然右转。在对面车道行驶时,地面车辆可选择在进入十字路口前停车或直接右转。对于自车而言,对面车辆的速度和轨迹是完全未知的。

为了测试自车在随机情况下使用 EBSC 时的性能表现,设置了两组仿真对象:一组为仿真客车配备 EBSC,另一组为仿真客车配备先进的紧急制动系统 AEBS。AEBS 通常无法预测未来与对面车辆的碰撞风险,因为它只能在自车车道上出现障碍物时才会发出碰撞警告。

如表 1 所示,每个测试集包含 100 次仿真测试,一共进行 1 200 次仿真测试。

表 1 仿真测试集设置

测试集	车速/(km/h)		对面车辆状态
	EBSC 组	AEBS 组	
编号 1	40	40	已停止
编号 2	40	40	运动中
编号 3	50	50	已停止
编号 4	50	50	运动中
编号 5	60	60	已停止
编号 6	60	60	运动中

2.3 仿真结果

在仿真过程中,当不可避免的碰撞发生时,记录自车的速度。记录的碰撞速度数据如图 10 所示。图中,小圆圈表示轻度异常值,位于四分位差的 1.5 倍~3.0 倍之间。此外,星号标记代表超过四分位差 3.0 倍的极端异常值。

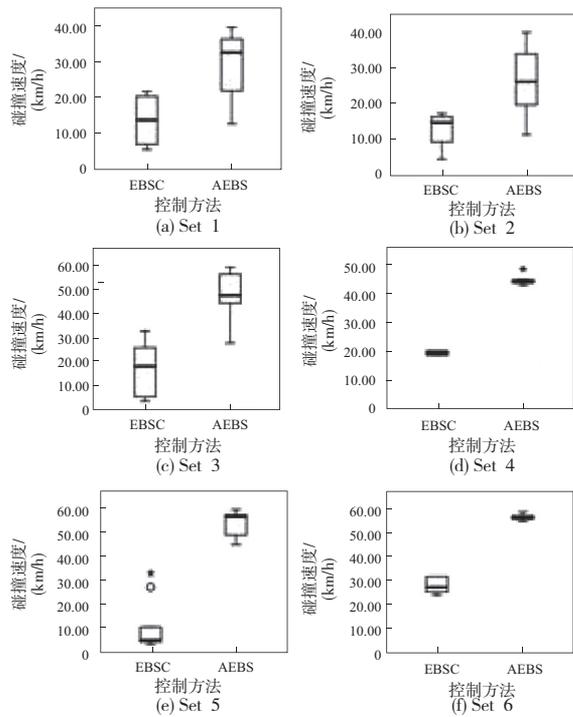


图 10 6 组仿真测试集中不可避免碰撞时自车的碰撞速度

对测试集进行单因素方差分析(ANOVA),根据统计学关于单因素完全随机实验的方差分析理论,若显著性 $p > 0.05$,则说明不同组之间方差齐性,表示各组之间均数差异不具有统计学意义;若显著性 $p < 0.05$,则说明不同组之间方差不齐,表示各组之间均数具有显著性差异。在测试集 1 和测

试集 2 中,EBSC 组与 AEBS 组的平均碰撞速度有显著差异(显著性 $p < 0.05$)。在其余 4 个测试集中,EBSC 组与 AEBS 组的平均碰撞速度更有显著差异(显著性 $p < 0.001$)。由此可以得出,当自行车和对面车辆碰撞不可避免时,EBSC 方法可以有效降低碰撞速度,进而减轻对驾乘人员的损害。

此外,EBSC 方法在降低碰撞率方面也表现较好。EBSC 组总体碰撞率(碰撞次数/模拟总次数)为 0.053%,AEBS 组为 0.177%。由此可以看出,EBSC 方法有效减少十字路口自行车和对面车辆可能发生的碰撞次数。

3 结语

本文提出了一种基于十字路口考虑对面车辆运动的自动驾驶车辆速度控制方法(EBSC)。与基于机器学习的方法相比,该方法需要的在线计算资源较小。为了验证所提出方法的有效性,通过仿真软件 V-REP 创建十字路口交叉口物理交通流场景,并采用单因素方差分析(ANOVA)方法,对测试仿真数据进行处理和解析。仿真测试结果表明,与现有的高级紧急制动系统(AEBS)相比,EBSC 方法在降低碰撞风险和不可避免碰撞中的平均碰撞速度方面表现更好,可以为开发相关的自动驾驶辅助驾驶系统提供参考。

本文中对面车辆的行驶轨迹和车速计算,由于人类驾驶员的意图不可预测而存在一定的误差,在系统决策和速度控制问题方面,后续可以基于 V2X 的方法获得其他交通参与者的详细信息,以提高自行车对对面车辆轨迹和车速的计算精度,进一步增强车辆安全性。

参考文献:

- [1] HUBMANN C, BECKER M, ALTHOFF D, et al. Decision making for autonomous driving considering interaction and uncertain prediction of surrounding vehicles [C]// 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2017.
- [2] O'MALLEY R, JONES E, GLAVIN M. Rear-lamp vehicle detection and tracking in low-exposure color video for night conditions [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11 (2): 453-462.
- [3] PINEAU J, GORDON G, THRUN S. Point-based value iteration: an anytime algorithm for POMDPs [C]// Proceedings of the 18th international joint conference on Artificial intelligence. Acapulco, Mexico: ACM, 2003: 1025-1030.
- [4] BAI H Y, CAI S J, YE N, et al. Intention-aware online POMDP planning for autonomous driving in a crowd [C]// 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seattle, WA, USA: IEEE, 2015.
- [5] 戴喆. 基于机器视觉的城市道路交叉口交通参数提取及交通信号控制 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [6] 孙亚. 基于车辆轨迹分析的交通场景感知与预测 [D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [7] URMSON C, ANHALT J, BAGNELL D, et al. Autonomous driving in urban environments: Boss and the Urban Challenge [J]. Journal of Field Robotics, 2008, 25(8): 425-466.
- [8] VAN DEN BERG J, LIN M, MANOCHA D. Reciprocal Velocity Obstacles for real-time multi-agent navigation [C]// 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena, CA, USA: IEEE, 2008.
- [9] 喻志成. 基于强化学习的典型交叉路口智能车决策控制研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [10] 孙杨欣. 基于优化方法的无人驾驶车辆局部轨迹规划方法的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [11] 徐彪, 张放, 王建强, 等. 连续交叉路口通行辅助系统 [J]. 汽车工程, 2016, 38(11): 1344-1350.
- [12] ASANO M, ALHAJYASEEN W K M, SUZUKI K, et al. Modeling the variation in the trajectory of left turning vehicles considering intersection geometry [C]// 90th Transportation Research Board Annual Meeting, [S.I.; s.n.]. 2011.
- [13] LEVIEN R L. From spiral to spline: optimal techniques in interactive curve design [D]. Berkeley: University of California, 2009.

收稿日期: 2023-03-20