

文章编号: 2095-2163(2023)12-0107-07

中图分类号: U461.1

文献标志码: A

一种基于可行驶区域的自动驾驶避撞方法研究

武鹏柯, 张伟伟, 武建龙, 程家镞

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 在自动驾驶技术普及的过程中, 车辆与道路行人之间的避撞方法一直是人们关注的热点话题。本文将行人运动的不确定性、运动车辆对行人运动的影响等因素与熵的概念相结合, 提出一种基于可行驶区域的自动驾驶避撞方法, 以自定义的车辆可行驶区域与对应空间熵的计算为基础, 再应用于车辆与行人之间的碰撞预测。首先, 利用车辆自身传感器获取的信息数据, 采用速度与路径规划叠加的方法来生成车辆备选的轨迹路线; 其次, 基于社会力模型与马尔可夫模型对行人位置进行预测, 得到行人位置概率; 最后, 根据目标优化算法得到车辆行驶的最优轨迹, 实现避撞。仿真实验表明, 本文提出的基于可行驶区域的自动驾驶避撞方法在不同的行车工况下可以有效地与行人进行安全避撞交互, 对于推动自动驾驶的发展、保障道路行人安全具有重要意义。

关键词: 自动驾驶; 可行驶区域; 空间熵; 避撞; 目标优化

Research on an autonomous driving collision avoidance method based on drivable area

WU Pengke, ZHANG Weiwei, WU Jianlong, CHENG Jiazhuo

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In the process of the popularization of autonomous driving technology, the collision avoidance method between vehicles and pedestrians has always been a hot topic. In this paper, the uncertainty of pedestrian movement, the influence of moving vehicles on pedestrian movement and other factors are combined with the concept of entropy, and an automatic driving collision avoidance method based on driving zone is proposed. This method is based on the calculation of self-defined vehicle driving area and corresponding space entropy, and then applied to the collision prediction between vehicles and pedestrians. First, the information data obtained from the vehicle's own sensor is used to generate the alternative trajectory route of the vehicle by the method of superposition of speed and path planning. Then the pedestrian position is predicted based on the social force model and Markov model to obtain the pedestrian position probability. Finally, the optimal trajectory of the vehicle is obtained according to the objective optimization algorithm to achieve collision avoidance. Simulation experiments show that the proposed automatic driving collision avoidance method based on driving zone can effectively interact with pedestrians safely under different driving conditions, which is of great significance to promote the development of automatic driving and ensure the safety of pedestrians on the road.

Key words: autonomous driving; driving area; spatial entropy; collision avoidance; objective to optimize

0 引言

自动驾驶技术不断完善的过程中, 研究人员更加注重自动驾驶汽车在道路参与交互过程中行人的安全问题, 行人避撞方法的可靠性程度可以很好的体现出自动驾驶技术研发的水平, 甚至影响自动驾驶车辆的普及程度。不断追求更加安全可靠的车辆行人避撞机制是实现全面自动驾驶必不可少的环节。

在车辆行驶的区域范围内, 道路行人更加容易受到伤害, 所以研究人员一直致力于改善避撞机制。Avinash 等^[1]通过汽车上配置的摄像头采集图像来进行道路行人检测, 如果传感器在一定范围内检测到行人后, 会释放警告信号提供给车辆系统或者使车辆系统采取紧急刹车来达到避撞的目的。有研究表明, 制动辅助系统只有大约 50% 的概率在碰撞事故中启动。Coelingh 等^[2]提出了自动紧急制动 (AEB) 系统, 避免车辆与行人碰撞; Park 等^[3]将传感器与制动系统以及转向系统相结合, 在获得自身

作者简介: 武鹏柯 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 计算机视觉与交通安全。

通讯作者: 张伟伟 (1985-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 智能网联汽车技术、机器视觉。Email: zwwsues@163.com

收稿日期: 2022-11-14

车与周围车辆的参数信息的同时作出避让措施,以减少发生碰撞事故的概率。

计算机技术和人工智能迅速发展,更多的主动避让方法被提出。如计算碰撞时间加速度模型、数学概率贝叶斯网络模型等被应用在车人交互场景上,这些模型结合路径规划算法生成相应的避让方法,但以上模型无法针对行人运动的不确定性这一特点进行有效的避让。

为了解决上述问题,在更加有效的时间内对行人与车辆的未来状态进行预判,方便车辆更加准确的进行轨迹规划,本文提出一种结合可行区域熵来构建风险感知的自动驾驶避让方法,将可行区域熵应用于自动驾驶的避让方法中,整体框架如图1所示。本文的方法会对行人进行轨迹预测,并通过行人与车辆可行区域内交互过程中熵的量,衡量车辆与行人碰撞的风险程度。在此基础上,以“感知风险”的熵值作为一种新的评估成本函数,通过优化算法,得到最优行人避让轨迹。通过模拟正常和紧急场景下的实验评估,表明本文所提出的基于可行区域的避让方法。

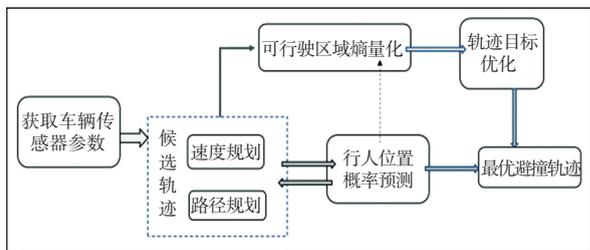


图1 整体框架

Fig. 1 Overall framework

1 车辆前方可行驶区域

为了保证自动驾驶汽车对于所处的驾驶环境有合理的时间去接收信息并作出恰当的反馈,反应空间的划定要贴合实际的驾驶状态和驾驶情景,本文基于 Jirovsky 等^[4]所提出的可行区域概念,定义了反应空间 Z , 表示在未来一段时间内车辆可能到达的区域,并且其范围曲线会受到未来连续的 k 秒内车辆的位置和车辆状态限制。综合考虑不同情况下的自动驾驶车辆状态,反应空间 Z 为汽车在接收到前方危险信息后自发的执行制动与转向等措施实现避让的过程中,车辆可能到达的位置空间。默认自动驾驶车辆是可以正常的接收信号并作出避让反馈,即不存在信号传递问题或者车辆没有响应的情况。

反应空间的范围曲线约束是由车辆的实时动态参量决定的,具体如下:

如图2所示,可行区域曲线边界 α 来源于车辆阻力产生的最大离心加速度,是在车辆没有突然加速或者减速的情况下,以匀速行驶时产生的一个封闭区域;车辆的位置变动就在该区域内,虚线部分就是匀速状态下对应的车辆半径。在图2坐标系下对应的位置 (x, y) 数学表达式如式(1)、式(2)所示,且可行区域曲线实心部分对应的数学表达式如式(3)所示:

$$x = \frac{v_0^2}{f_{\max}g} \cos \frac{f_{\max}g}{v_0} \quad (1)$$

$$y = \frac{B}{2} + \frac{v_0^2}{f_{\max}g} \sin \frac{f_{\max}g}{v_0} \quad (2)$$

$$x_r = \int_0^t (f_{\max}g + a_r) dt \quad (3)$$

其中, v_0 、 g 、 B 分别为车辆的初始速度、重力加速度和车辆宽度; a_r 是车辆的瞬时减速度,由车辆行驶过程中遇到的空气阻力、滚动阻力、坡度阻力所产生; t 表示车辆速度变为0的时间(停车时间)或将来某一时刻需要知道车辆位置的时间; f_{\max} 表示轮胎与路面可达到的最大摩擦系数。

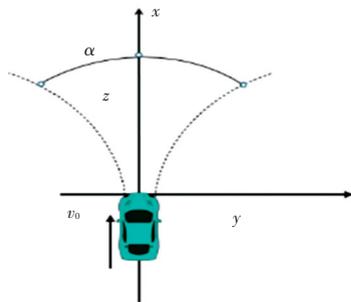


图2 车辆可行区域

Fig. 2 Vehicle driving area

综上所述,可以得到一个封闭的反应空间 Z , 即在区域范围内的轨迹点对于车辆来说都是可达的。

2 熵的概念与量化

熵作为一个系统混乱程度的度量,计算表达式如式(4)所示:

$$S = -K \sum_{i=1}^n p_{(x)_i} \ln p_{(x)_i} \quad (4)$$

其中, $p_{(x)_i}$ 是系统实体在特定状态 x_i 下出现的概率函数; n 是可能状态的总数; K 是系统定义的常

数。

为了结合实际的情景, 本文定义 $\boldsymbol{\vartheta}$ 代表所约束的反应空间区域中存在实体的一个向量, $P(\boldsymbol{\vartheta}_i)$ 表示存在第 i 个实体的概率。假如实体为行人, 则指车辆反应空间中涉及的第 i 个行人出现的概率, $\boldsymbol{\aleph}$ 定义为第 i 个实体与车辆之间的 j 个唯一交互的向量, $P(\boldsymbol{\aleph}_j)$ 表示每个向量 j 交互的概率, 即行人在反应空间中不同位置下与车辆的碰撞交互概率。需要说明的是: 当反应空间内不存在行人, 即是实体 $P(\boldsymbol{\vartheta}_i)$ 概率为 0, 对应的实体之间相互作用的概率 $P(\boldsymbol{\aleph}_j)$ 也为 0, 在此情况下, 本文所描述的反应空间熵量化可以用式(5)来表示:

$$S(\boldsymbol{\vartheta}, \boldsymbol{\aleph}) = -\frac{1}{S_z} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (P(\boldsymbol{\vartheta}_i) \ln P(\boldsymbol{\vartheta}_i) + P(\boldsymbol{\vartheta}_i) \ln P(\boldsymbol{\aleph}_j)) \quad (5)$$

本文仅考虑单个行人避碰的情况, 假设当反应空间内潜在在实体只有一个行人时, $P(\boldsymbol{\vartheta}_i) = 1$, 则表示车辆与行人潜在碰撞交互行为的反应空间熵的表述可以简化为式(6):

$$s(\boldsymbol{\vartheta}, \boldsymbol{\aleph}) = -\frac{1}{S_z} \sum_{j=1}^n \ln P(\boldsymbol{\aleph}_j) s(\boldsymbol{\vartheta}, \boldsymbol{\aleph}) = -\frac{1}{S_z} \sum_{j=1}^n \ln P(\boldsymbol{\aleph}_j) \quad (6)$$

此时, $\ln P(\boldsymbol{\aleph}_j)$ 可以用行人在发生碰撞时刻处在反应空间中出现的不同位置的概率表示。基于预测的行人位置反应空间熵值应当是一个大于或者等于零的不确定常数。在生成的候选轨迹系列中, 选定具体的某一条车辆轨迹后, 结合车辆与行人之间的交互影响, 推测该轨迹随时间推移对应行人位于碰撞预测区域的位置及其概率。同时, 可以使用对应时刻反应空间的面积 S_z 代替式(4)计算常数 K 。由此可以得到系统在此状态下表示人车碰撞风险的熵值如式(7)所示:

$$s(\boldsymbol{\vartheta}, \boldsymbol{\aleph}) = -\frac{1}{S_z} \sum_{j=1}^n \ln P(\boldsymbol{\aleph}_j) L_j^{\alpha} \quad (7)$$

不同轨迹下, 行人对应的位置概率不同, 系统的熵值也会不同, 将系统的反应空间熵作为一种评估候选轨迹的代价函数, 结合目标优化, 确定最优的避撞轨迹策略。

3 候选轨迹生成

3.1 路径规划

实现自动驾驶车辆产生安全而连续的路径, 就要尽可能地确定路径中每个位置点相对于上一个存

在的位置点平滑, 无限接近于理想的避让路径, 同时又道路宽度等条件约束边界以内。而五次多项式的路径规划方法可以满足每个轨迹点上的速度、加速度、位移等多条件的约束进行连续的重新规划, 从而可以确定更加安全、稳定的候选轨迹。结合车辆模型与定义的参量, 具体的路径规划方程如式(8)~式(10)所示:

$$\dot{x}_i^{veh} = v_i^{veh} \cdot \cos \theta_i^{veh} \quad (8)$$

$$\dot{y}_i^{veh} = v_i^{veh} \cdot \sin \theta_i^{veh} \quad (9)$$

$$\dot{\theta}_i^{veh} = v_i^{veh} \cdot k \quad (10)$$

其中, v_i^{veh} 、 θ_i^{veh} 分别为 i 时刻车辆的速度与航向角, k 是当前时刻候选路径对应的曲率。 k_{lim} 为所在车辆施加的转向限制极限值 ($k \leq k_{lim}$), 如式(11)所示:

$$k = \frac{\dot{x}_i^{veh} \ddot{y}_i^{veh} - \ddot{x}_i^{veh} \dot{y}_i^{veh}}{((\dot{x}_i^{veh})^2 + (\dot{y}_i^{veh})^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (11)$$

式(8)~式(10)五次多项式路径规划算法位置信息是基于笛卡尔坐标系, 对应的约束如式(12)所示:

$$y(x_i^{veh}) = \begin{cases} \sum_{\tau=0}^5 a_{\tau} \cdot x^{\tau}, & 0 \leq x_i^{veh} \leq x_{final} \\ y_{final}, & x_i^{veh} \geq x_{final} \end{cases} \quad (12)$$

其中, a_{τ} 是五次多项式的方程系数。

x_{final} 、 y_{final} 为避撞轨迹最终点横纵的位置参数, 其约束满足式(13)~式(16):

$$\frac{dy(0)}{dx} = \tan \theta_i^{veh} \quad (13)$$

$$\frac{d_y^2(0)}{d x^2} = \frac{1}{[\dot{x}(t)]^2} \left[\ddot{y}(t) - \frac{\ddot{x}(t) \cdot \dot{y}(t)}{\dot{x}(t)} \right]_{t=0} \quad (14)$$

$$y(x_{final}) = y_{final} \quad (15)$$

$$\dot{y}(x_{final}) = \ddot{y}(x_{final}) = 0 \quad (16)$$

其中, y_i 表示在一个规划周期内建立的坐标系沿 y 轴的初始坐标位置; θ_i^{veh} 为车辆在对应周期内的初始航向角; $\dot{x}(t)$ 和 $\ddot{x}(t)$ 分别为车辆对应纵方向的速度与加速度; $\dot{y}(t)$ 和 $\ddot{y}(t)$ 为所建立坐标系下的横向速度与加速度。

式(8)~式(16)涉及的参数在实际中可以直接由车载设备获取, 不在本文的研究范围, 在实际的仿真实验中, 可以依据具体情况进行数据的赋值处理。

3.2 速度规划

速度规划也是非常重要的一个环节, 直接影响到车辆的稳定以及乘员驾驶体验的舒适程度。车辆横向加速度的变化趋势越陡, 舒适性就会越低。

本文提出一种平滑速度梯形剖面生成策略,为了更好地提高车辆的舒适性,在使用梯形速度剖面生成积分速度曲线的基础上,同时采用三次多项式样条函数来平滑线速度分布,刻画出更加平滑且连续变

化的速度-加速度曲线,同时结合车辆与行人安全速度碰撞伤害风险曲线,衡量选取参数 C_{sv} 作为速度风险安全系数,量化速度安全性。速度规划如图3所示。

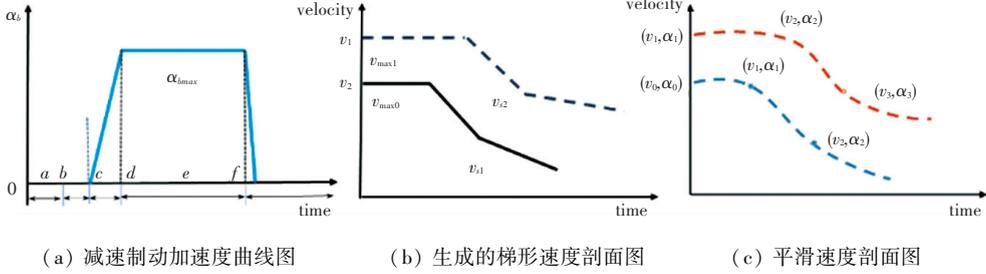


图3 速度规划图

Fig. 3 Velocity planning diagram

在图3中, t_{ab} 表示制动前的驾驶员反应时间, t_{bc} 表示制动系统克服制动间隙的时间。在此时间段内的车速和行驶状态如式(17)~式(19)所示:

$$v(t) = v_{veh}(0) \quad (17)$$

$$x(t) = \int_0^t V(t) dt \quad (18)$$

$$X_{bc} = \int_0^{t_{bc}} V(t) dt \quad (19)$$

其中, $v(t)$ 是车辆在该阶段内关于时间的速度函数; $x(t)$ 是车辆在此时间段内的位移函数; X_{bc} 是车辆在该周期内的车辆沿着 x 轴方向位移; $v_{veh}(0)$ 是车辆的初速度。

t_{cd} 阶段是制动系统克服制动间隙后制动加速度快速增长的时期;在这个时期,速度下降,对应的车辆的速度和位移如式(20)~式(22)所示:

$$v(t) = v_{veh}(0) \int_{t_b}^t a(t) dt \quad (20)$$

$$x(t) = \int_{t_b}^t v(t) dt + X_{bc} \quad (21)$$

$$X_{cd} = \int_{t_{bc}}^{t_c} v(t) dt \quad (22)$$

其中, $a(t)$ 是车辆关于时间 t 的加速度函数; X_{cd} 是车辆在该时间段内沿着 x 轴方向的位移。

t_{de} 是连续制动的的时间。为确保安全,应尽快将车辆速度降至可控速度,制动减速度保持在最大值,车辆速度应降低至可变安全速度 v_s 。此期间,车辆的速度、持续制动至安全速度的时间和车辆位移如式(23)~式(26)所示:

$$v(t) = v_{veh}(t_d) - \int_{t_d}^t a_{bmax} dt \quad (23)$$

$$t_{de} = \frac{v_{veh}(0) - 0.5 a_{bmax} \cdot t_{bc} - v_s}{a_{bmax}} \quad (24)$$

$$x(t) = \int_{t_b}^t v(t) dt + x_{bc} + x_{cd} \quad (25)$$

$$X_c = \int_{t_b}^{t_{be}} v(t) dt \quad (26)$$

其中, a_{bmax} 是正常车况下的最大制动减速度。

当制动减速度变为0后,车辆的速度应当变为安全速度范围以内,并且此后时间车辆以恒定速度行驶,完成避撞的过程。在 t_f 时间段内,车辆速度、位移、匀速行驶时间和到达碰撞区的时间如式(27)~式(29)所示:

$$v(t) = v_s \quad (27)$$

$$x(t) = \int_{t_{be}}^t V(t) dt + X_{de} + X_{cd} + X_{bc} \quad (28)$$

$$t_f = \frac{x_{ped}(0) - X_s - X_{cd} + X_{bc}}{v_s} \quad (29)$$

其中, $x_{ped}(0)$ 计入的是行人初始 x 轴方向所处的位置坐标。

同时,可以得出车辆检测到行人进入潜在的碰撞区域周期时间如式(30)所示:

$$t_{tcz} = t_{bc} + t_{cd} + t_{de} + t_{ef} \quad (30)$$

计算得出的 t_{tcz} 可用于预测后续的行人位置在对应时刻位置所处的概率。基于以上过程可以得到各个阶段的制动速度曲线。为了加强稳定和舒适特性,本文对速度剖面使用三次多项式进行简化的参数化操作,进一步平滑梯形速度曲线,以保证曲线的

连续性, 式(31):

$$v_{\text{smooth}}(t) = v_0 + at + bt^2 + ct^3 \quad (31)$$

根据式(31), 分别对每个阶段的速度表达式进行一阶求导数和积分, 可得到对应加速度 $a_{\text{smooth}}(t)$ 和对应的路径长度 $x(t)$ 。已知初速度 v_0 和以及对应加速度 a_0 , 平滑后的速度 $v_{\text{smooth}}(t)$ 可通过式(32)~式(35)解析求解:

$$a_0 = a \quad (32)$$

$$v_{\text{smooth}}(t) = v_0 + at_s + bt_s^2 + ct_s^3 \quad (33)$$

$$a_s = a + 2bt_s + 3ct_s^2 \quad (34)$$

$$x(t_s) = v_0 t_s + \frac{1}{2}at_s^2 + \frac{1}{3}bt_s^3 + \frac{1}{4}ct_s^4 \quad (35)$$

得到不同阶段的减速和速度曲线, 以及进行平滑处理后的速度曲线和对应的时间序列。将上述路径与相应时间序列的速度剖面相结合, 生成系列备选轨迹序列 L_k^{tra} , 表示为式(36):

$$L_{k_i}^{\text{tra}} = (y_{\text{final}, k_i}, \nu_{s, k_i}) \quad (36)$$

4 轨迹优化与评估

4.1 行人位置概率预测

本文基于 Feng 等^[5]的车辆与行人交互模型, 在限定车辆速度和人车距离以道路边界的条件下, 将行人视为一个独立个体, 其运动视为无干扰的马尔可夫过程; 结合社会力模型量化车辆对于行人的位置、速度的影响, 在具体的轨迹中, 可以得到车辆任意时刻

对行人的作用力, 计算出下一时刻的行人状态参量, 迭代得到最终时刻的行人未来运动位置的概率预测。在此过程中假设行人在穿过马路时为了尽快的通过, 行人的轨迹几乎选择为直线; 行人与车辆的初始垂直纵向距离已知, 且有已知道路边界约束。

行人在不同状态下的受力示意图如图 4 所示, α 表示任意 i 时刻车行与行人连接线与 y 轴的夹角, 图 4(a) 中 F_i^{Pedfree} 表示行人自由运动下的受力状态, 图 4(b) 中 F_i^{Pedfree} 表示行人叠加受力状况, F_i^{Veh2Ped} 表示行人在任意时刻 i 受到的车辆对行人状态的映射力, 行人最终受力 F_{total} 取决于矢量加的叠加, 如式(37)所示:

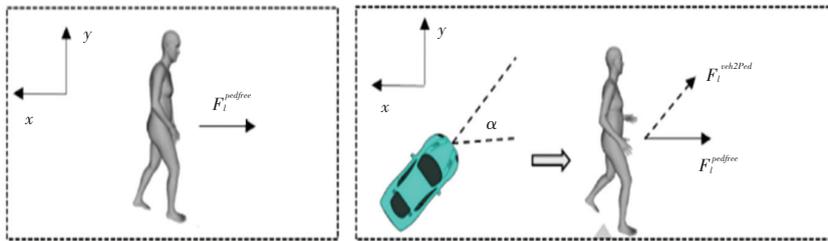
$$F_i^{\text{Ped}} = F_{\text{total}} = F_i^{\text{Pedfree}} + F_i^{\text{Veh2Ped}} \quad (37)$$

行人的运动具有不确定性, 马尔可夫过程是一个随机过程, 下一时刻的结果取决于当前时刻的状态, 可以很好的描述行人的无干扰运动状态。依据马尔可夫过程对行人的状态描述, 如式(38)~式(39)所示:

$$y_{i+1}^{\text{Ped}}(t) = y_i^{\text{Ped}}(t) + \Delta y \quad (38)$$

$$v_{i+1}^{\text{Ped}}(t) = v_i^{\text{Ped}}(t) + \Delta v \quad (39)$$

其中, $y_{i+1}^{\text{Ped}}(t)$ 为在 $(i+1)$ 时刻行人沿着 y 方向位置关于时间 t 的函数; $v_{i+1}^{\text{Ped}}(t)$ 为在 $(i+1)$ 时刻行人速度关于时间 t 的函数; Δy 与 Δv 则表示在此时间内行人步长规律引起的位置与速度的变化量。



(a) 自由运动状态

(b) 受自身与车辆的共同作用状态

图 4 行人状态示意图

Fig. 4 Schematic diagram of pedestrian status

假设行人在过马路几乎沿着垂直方向行走, 则在沿着 y 方向上的速度时间函数满足式(40):

$$v^{\text{ped}}(t) = \dot{y}^{\text{ped}}(t) \quad (40)$$

根据 Helbing 等^[6]关于行人步长速度位置变化的研究, 假设行人以恒定的速度在此时间段内移动, 可以得到如式(41)所示的行人步长速度表达式:

$$\Delta v_{\text{ped}} = -\varphi [v_{\text{ped}}(t) - \hat{v}] + \varepsilon \quad (41)$$

其中, φ 为速度变化系数; \hat{v} 为行人的平均速度; ε 为行人运动的随机波动; 符合高斯模型的概率分布规律。

根据行人步态仿真、运动情景分析与力学定律, 式(42)和式(43):

$$F_i^{\text{Pedfree}} = m \cdot \frac{dv_{\text{Pedfree}}(t)}{dt} \quad (42)$$

$$F^{Veh2Ped} = \varphi^{v2p} \cdot \exp[\gamma^{v2p} \cdot (r_v + r_p - d_{vp})] \quad (43)$$

其中, m 是行人的模拟质量; $v_{pedfree}(t)$ 是行人自由运动状态下关于时间 t 的速度函数; r_v 是车辆安全行驶半径; r_p 是设定的行人的安全步行半径; d_{vp} 是行人与车辆之间的实时距离; φ^{v2p} 和 γ^{v2p} 分别为行人与车辆相互作用力的强度系数和距离系数。

4.2 轨迹优化函数

避撞的预测轨迹中, 车辆与行人之间的纵向距离可用式(44)表示:

$$d_{cp}(t) = \{(x_v(t) - x_{ped}(t))^2 + (y_v(t) - y_{ped}(t) + y_{pedvp}(t))^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (44)$$

衡量安全的代价函数如式(45)所示:

$$p_d(L_i^{tra}) = C_{vs} / (d_{cp}^n - r_{veh} - r_{pe}) \quad (45)$$

其中, C_{vs} 为速度安全系数。

在车辆进行紧急避让操作时, 如果转向的幅度过大, 很容易造成车辆的不稳定, 甚至侧翻, 驾驶体验十分的不舒服。所以, 在衡量车辆选择轨迹时综合平滑性, 用候选轨迹的曲率积分, 衡量横向舒适性与稳定性, 约束条件如式(46)所示:

$$p_c(L_i^{tra}) = \frac{1}{x(t_s)} \int_0^{x(t_s)} \frac{\|k(L_i^{tra}(s))\|}{k_{max}} ds \quad (46)$$

其中, $k(L_i^{tra}(s))$ 为候选轨迹, L_i^{tra} 为对应的曲率值。

结合描述的反应空间熵值, 整体的成本条件还应当满足在一定轨迹下的区域反应空间熵值限定在安全的范围, 即应满足公式(47)约束:

$$cost_s(L_i^{tra}) = S_{k_i}(\mathfrak{D}, \mathfrak{N})_{L_i^{tra}} = -\frac{1}{S_z} \sum_{j=1}^n \ln P(\mathfrak{N}_j)_{L_i^{tra}} \quad (47)$$

结合式(45)~式(47)的因素, 本文给出的风险成本函数如式(48)所示:

$$Cost(J_p, L_{k_i}^{tra}) = J_c \cdot cost_c(L_{k_i}^{tra}) + J_d \cdot cost_d(L_{k_i}^{tra}) + J_s \cdot cost_s(L_{k_i}^{tra}) \quad (48)$$

确定好轨迹优化函数后, 可以通过非支配排序遗传算法 NSGA-II 来实现轨迹的筛选。非支配排序遗传算法 NSGA-II 是在遗传算法的基础上发展起来的一种优化算法, 增加了快速非支配排序方法和精英策略, 提高了计算复杂度和种群多样性, 实现了快速准确的搜索性能^[7]。

5 实验结果分析

5.1 实验环境

本文使用 CARLA 仿真平台进行实验验证分析, 仿真场景如图 5 所示。

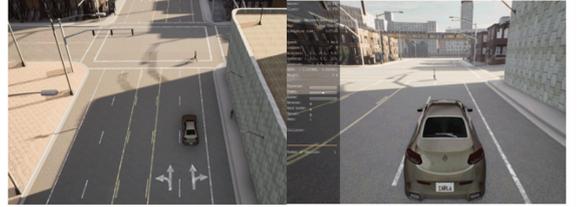


图 5 实验仿真场景

Fig. 5 Experimental simulation scene

仿真设置条件共有 3 种情况, 其中包括了正常范围、紧急范围以及临界制动范围不同情况; 在上述 3 种成本函数的作用下, 第一组设置为: 城市道路场景中, 车辆与行人的行驶方向呈垂直状态, 车辆与行人之间的距离为 20 m, 车辆的初始速度分别为 40 km/h 和 50 km/h 进行交互, 仿真编号为 A(1)、A(2); 第二组车辆设置为相同的速度, 但是车辆与行人的初始距离调整为 10 m, 仿真编号为 A(3)、A(4)。分析可知, A(1) 条件下, 行人与车辆的初始距离接近最小的制动距离, 属于临界交互状态; 在 A(2) 条件下, 行人与车辆的初始距离已经超出了最短制动的范围, AEB 的作用会失效, 属于危险交互的情况; 在 A(3) 和 A(4) 条件下, 车辆与行人的初始距离在安全制动范围内。主要的仿真实验参数见表 1。

表 1 主要的仿真实验参数

Table 1 The main simulation experiment parameters

参数描述	参数符号	数值
行人步行平均速度	V	(1.25±0.05) m/s
行人步距	r_{pe}	0.35 m
车辆安全行驶半径	r_{vehs}	1.6 m
安全权重系数	J_c	0.2
稳定权重系数	J_d	0.2
可行驶区域熵权重系数	J_s	0.6
相互作用系数	$\varphi^{v2p} / \gamma^{v2p}$	4.5/5.5
安全速度系数	c_{sv}	$\frac{3.6v_s}{2 \cdot 9.8} / 9.8$

5.2 结果分析

基于上述定义的情况, 其场景仿真生成的轨迹结果如图 6 所示, 即是在基于速度和路径的叠加以及优化过程可以得到不同情况下最优的轨迹分布集合综合情况下最优的轨迹。

在 A(1) 条件下, 行人与车辆之间的初始距离为 20 m, 距离相对安全, 可以减速到安全的速度范围内与行人避撞交互。基于距离优势, 在反应空间内, 依据预测的行人位置, 可规划的速度选择与路径结合的避撞轨迹相对较多。在 A(2) 条件下, 与 A(1) 相比, 同等距离下, 初始速度更高, 但是由于距离的弥补, 同样可以在允许的安全范围内进行多个速度的路径优化。

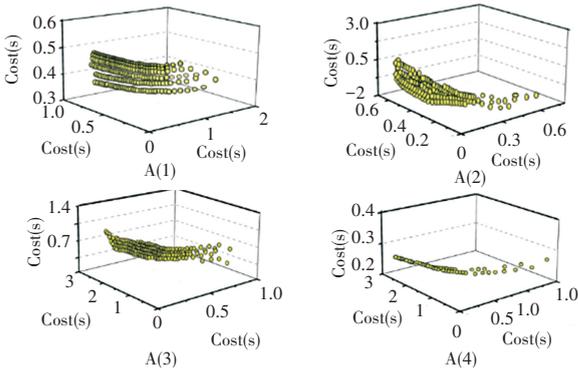


图 6 仿真生成的候选轨迹

Fig. 6 Candidate trajectories generated by simulation

在 A(3) 条件下, 行人与车辆之间的初始距离为 10 m, 属于制动安全距离的临界范围左右, 此时的车速可以减速到相对较低的速度进行交互, 结合预测的行人位置, 在反应空间内, 速度与路径的规划结合仍有不少解集可供选择。在 A(4) 条件下, 车辆与行人的初始距离较短, 已经不足以满足车辆减速到安全速度, 为了降低碰撞的风险, 速度规划需要持续的减速, 这样就造成了优化的解集较少。

基于同等场景下, 将该项工作的成果与传统的 AEB 相比(见表 2), 在 A(3) 与 A(4) 条件下, 本文所提出的避撞方法与单纯的 AEB 制动相比, 都可以保证安全性, 但是, 本文所提出的策略更加的机动性, 可以更好地应对道路状况, 提升交通效率。在 A(1) 的条件下, 车辆与行人初始距离在安全制动的临界范围, 本文方法就安全性而言, 轨迹的成本函数优于 AEB 制动。在 A(2) 的危险制动情况下, 本文的方案在安全成本函数上相对于 AEB 有所降低。

综合来看, 本文方案可以在整个避撞过程中, 很好地满足安全性能要求, 而且本文中设置的可行驶区域熵可以在安全和稳定方面进行综合的评估, 在一定程度上弥补了单一评估侧偏的影响。

表 2 实验结果对比

Table 2 Comparison of experimental results

组别	$y_{\text{final}} / \text{m}$	$v_x / (\text{km/h})$	cost_c	cost_d	cost_s
A(1)	1.97	14.72	0.065	0.069	0.548
AEB	1.55	0	0	0.045	0
A(2)	1.83	11.35	0.025	0.057	0.732
AEB	1.55	0	0	0.045	0
A(3)	2.98	16.25	0.547	0.274	0.365
AEB	1.55	0	0	∞	0
A(4)	2.83	1.63	0.349	0.092 3	0.236
AEB	1.55	0	0	∞	0

6 结束语

本文提出了一种基于车辆可行驶区域的避撞方法, 基于行人与车辆相互作用模型的基础上, 规划了空间路径和时间速度等候选轨迹, 并概率性地预测行人的不确定运动, 结合熵概念评估候选轨迹的碰撞风险; 通过 NSGA-II 算法筛选出最优的避碰轨迹, 最终获得了安全、稳定、高效的避碰轨迹。仿真结果表明, 该策略在紧急情况和正常情况下都可以有很好的避撞效果。本文研究的对象只是单一车辆和行人之间的互动, 在进一步的研究中, 将重点关注多行人的避碰的情景。

参考文献

- [1] AVINASH R, NIRESH J, KUMAR V H, et al. Investigation of pedestrian collision avoidance with auto brake[C]//Proceedings of 2017 Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE). IEEE, 2017: 477-481.
- [2] COELINGH E, EIDEHALL A, BENGTTSSON M. Collision warning with full auto brake and pedestrian detection—a practical example of automatic emergency braking [C]//Proceedings of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE, 2010: 155-160.
- [3] PARK J, KIM D, HUH K. Emergency collision avoidance by steering in critical situations [J]. International Journal of Automotive Technology, 2021, 22: 173-184.
- [4] Jirovsky V. Entropy in reaction space – upgrade of time – to – collision quantity[R]. SAE Technical Paper, 2017.
- [5] FENG J, WANG C, XU C, et al. Active collision avoidance strategy considering motion uncertainty of the pedestrian[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 23(4): 3543-3555.
- [6] HELBING D, MOLNAR P. Social force model for pedestrian dynamics[J]. Physical Review E, 1995, 51(5): 4282.
- [7] 高媛. 非支配排序遗传算法 (NSGA) 的研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.