

综述 · 评论

自动驾驶故障安全运动规划方法综述

唐仕祺¹, 李 柏¹, 张友民²

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 康考迪亚大学 机械、工业与航空工程系, 魁北克 蒙特利尔 H3G 1M8)

摘 要: 故障安全运动规划方法隶属于自动驾驶车辆的车端决策模块, 其研究目前处于快速发展的初期阶段。与经典的运动规划算法相比, 故障安全运动规划算法致力于生成尽量保证乘客和车辆安全且能够充分利用剩余自动驾驶能力(感知、决策和控制能力)的局部运动轨迹; 充分发掘运动规划的潜力与智慧属性, 以弥补或缓解系统各模块的可能故障, 为自动驾驶系统提供高自主性行驶安全保障。文章梳理和回顾了故障安全运动规划领域现有研究成果, 首先介绍了故障安全运动规划的历史渊源、故障类型并归纳其定义, 阐述了感知、决策与控制模块分别发生故障时的故障安全规划方法, 最后展望该领域未来的发展方向。

关键词: 故障安全运动规划; 运动规划; 轨迹规划; 自动驾驶

中图分类号: TP273; U471.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2021)06-0001-13

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2021.06.300

A Survey on Fail-safe Motion Planning Methods for Autonomous Driving

TANG Shiqi¹, LI Bai¹, ZHANG Youmin²

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

2. Department of Mechanical, Industrial & Aerospace Engineering, Concordia University, Montreal, Quebec H3G 1M8, Canada)

Abstract: Fail-safe motion planning method belongs to the decision-making module of automatic driving vehicle, and its research is in the early stage of rapid development. Compared with the classical motion planning algorithm, the fail-safe motion planning algorithm is committed to generating local motion trajectories that ensure the safety of passengers and vehicles as much as possible, and makes full use of the remaining automatic driving ability (perception, decision-making and control ability), so as to fully explore the potential and intelligent attributes of motion planning to make up or alleviate the possible faults of each module of the system. It provides high independent driving safety for automatic driving system. This paper reviews the existing research results in the field of fail-safe motion planning. Firstly, it introduces the historical origin and failure types of fail-safe motion planning, summarizes its definition, then expounds the fail-safe planning methods under the condition of failure of perception, decision-making and control modules, and finally looks forward to the future development direction of this field.

Keywords: fail-safe motion planning; motion planning; trajectory planning; autonomous driving

0 引言

自动驾驶汽车是指通过搭载先进传感器装置、

运用人工智能新技术、具有自动驾驶功能、逐步成为智能移动空间和应用终端的新一代汽车^[1]。近年来汽车自动驾驶技术得到了飞速发展, 众多研发和应用自动驾驶技术的企业已基本实现了 L3 级别自动驾驶, 但随之而来的交通事故问题引起了社会对自动驾驶汽车安全性、可靠性的担忧^[2-4]。在向着 L4 甚至是 L5 级别自动驾驶技术发展的进程中, 如何妥善应对车载软硬件系统突发故障情况是一项与自动

收稿日期: 2021-10-15

作者简介: 唐仕祺(1998—), 男, 硕士研究生, 从事智能车故障安全运动规划研究。

基金项目: 国家自然科学基金(62103139, 61833013); 湖南省自然科学基金(2021JJ40114); 中央高校基本科研业务费(531118010509)

驾驶车辆的安全属性紧密联系的议题^[5-11]。

在L2/L3级别辅助自动驾驶系统中,由驾驶员紧急接管车辆是目前应对故障的主要手段。L4/L5级别自动驾驶系统要求车辆具备自主应对故障和紧急风险的能力^[12],以更高水平的自主智能技术来保障乘客及其他交通参与者的安全^[13-15]。为实现L4/L5级别的高自主性行驶安全,一项关键任务是如何计算在故障出现之后的工况下尽量保障安全、舒适的局部行车运动轨迹,该任务被称为故障安全运动规划(fail-safe motion planning)。

故障安全运动规划隶属于车端决策模块的运动规划环节。与经典的运动规划算法相比,故障安全运动规划算法致力于充分发挥决策模块的智慧能力,对因模块故障而丧失的车辆额定功能予以补救。例如,针对自动驾驶车辆正常前向行驶时其前方突然窜出行人或是车载设备突然出现故障工况,经典的运动规划方法往往采取紧急制动、应激性避让或靠边停车等简单方案,这些基于规则的方案不可能完全覆盖所有的突发状况,也未必是突发状况下的最优解。相比之下,故障安全运动规划要求自动驾驶车辆提前识别环境中的盲区,从而提前规划出规避潜在碰撞隐患的轻微绕行轨迹;或是在并行线程中为环境中随时出现的最坏情况做安全冗余规划;亦或是结合车辆在故障工况下的剩余功能重构规划命题,继而生成恰当的行驶轨迹。总之,故障安全运动规划致力于利用规划环节的智能计算来强化车辆在出现故障或存在故障隐患工况下的安全行驶能力。

自动驾驶技术的发展目前正从科研探索期向产业孵化期过渡转型,所开发的稳定可靠、高效智能的故障安全运动规划方法将在自动驾驶车辆的量产进程中发挥推动与促进作用。故障安全运动规划方法的研究目前仍处于萌芽阶段,国内外的相应研究成果零星出现,尚未形成稳定的研究体系,也没有系统性介绍故障安全运动规划方法的综述类文献。本文梳理和回顾了该领域现有研究成果,以期故障安全运动规划方法能够获得学术界与产业界的广泛重视。

本文针对感知、决策、控制各执行模块分别发生故障条件下的故障安全运动规划方法研究工作予以回顾。首先,将给出故障安全运动规划的基本概念,并界定本文关注的故障含义;然后,分别从上游感知模块出现故障、决策模块自身出现故障以及下游控制模块出现故障等不同角度回顾相应的故障安全运动规划方法(需要说明的是,源于控制学科的容错控制方法在应对底盘执行机构失效时承担了故障安全运

动规划的一部分决策职责,本文将此类控制方法纳入故障安全运动规划方法的回顾范畴之内);最后,展望了故障安全运动规划方法的未来发展方向,并对全文进行总结。

1 故障安全运动规划简介

1.1 故障安全理念的历史渊源

故障安全技术用于降低或消除突发故障对系统的损害^[16],其在汽车工业的早期应用可追溯到1989年由日本丰田汽车公司Shingo^[17]提出的防呆(Poka-Yoke)设计理念^[18]。“防呆”是源于日本围棋与将棋的术语;而在现代化工业生产过程中,防呆是一种预防矫正的行为约束手段,其运用避免产生错误的限制方法,让操作者不需要花费注意力、也不需要过多的专业知识与经验即可准确无误地完成正确的操作。例如,手机SIM卡片的缺角设计即采用了防呆缺口理念,它可有效杜绝用户在手机插槽中将SIM卡片插反。在汽车制造产业领域,防呆机制的广泛应用大幅降低了人为因素导致的零部件缺陷率^[19]。防呆作为避免故障酿成不良后果的主动预防手段被广泛应用于工业生产及产品设计中,并逐渐演变为故障安全技术手段。自动驾驶汽车作为新兴的智能化产品,其复杂软硬件设计带来的潜在故障风险为车辆故障安全技术的发展带来了更多机遇与挑战。

1.2 自动驾驶车辆故障的界定

典型的自动驾驶系统模块包括感知模块、决策模块与控制模块。车辆在行驶过程中可能发生的故障类型有多种,本文将聚焦其中3类故障,其分别发生于自动驾驶车辆的感知、决策以及控制模块之中,并界定若干种适合由运动规划方法介入干预的车辆故障情形(图1)。

感知模块的作用是提供车辆自身运动状态信息(如车辆位置、姿态及行驶速度等)以及外部环境信息(如周围障碍物的位置、大小、类别以及运动趋势)。适合由运动规划环节介入的感知模块故障包括传感器损毁与传感器作用范围受限。损毁是指车载传感器因遭受外部损害而失效;作用范围受限是指传感器虽工况正常,但感知能力受到外部环境因素(例如遮挡)制约。

决策模块的作用是依据上游感知模块输出的结果生成开环行车轨迹。决策模块可能出现的故障包括硬件层面的车载计算资源受限以及软件层面的运动规划算法失败。计算资源受限故障出现的原因是车

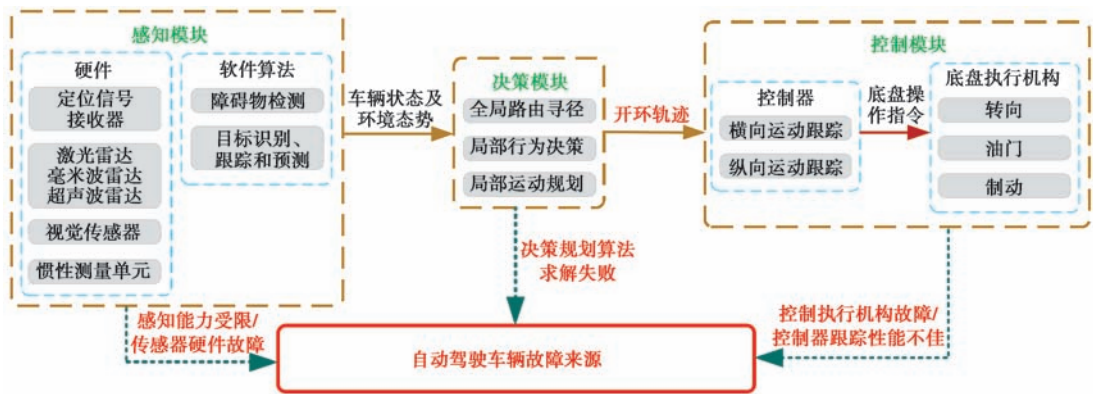


图 1 自动驾驶系统模块分布及故障来源

Fig. 1 Module distribution of automatic driving system and source of fault

载处理器发生了物理性质改变，包括受到外部撞击、遭遇温度骤变、电气线路局部短路或断路等。算法求解失败故障的原因除算法完备性差这一自身因素外，还包括一些典型的外部因素，如因行车情境发生显著变化而导致的既定运动规划命题不存在任何可行解情况。

控制模块负责对上游决策模块提供的开环轨迹进行闭环跟踪，计算出所需的横、纵向运动控制量（转向角、加速度等），并驱动底盘执行机构完成转向、加速和制动等操作。适合由运动规划环节介入的控制模块故障包括控制器跟踪性能不佳和底盘执行机构失效。跟踪性能不佳是指由于控制器算法结构设计或参数匹配不当造成的轨迹跟踪误差过大。底盘执行机构失效是指转向或动力等底盘执行机构故障导致车辆部分或全部丧失对运动控制指令的响应能力。

1.3 故障安全运动规划的研究内容

故障安全运动规划旨在通过决策模块的运动规划方法消除或削弱 1.2 节所述故障的影响。如图 2 所示，故障安全运动规划方法在准确了解车辆剩余工作能力（感知、决策和控制能力）的前提下重构运动规划问题并进行快速求解。需要说明的是，故障安全运动规划顺利实现的重要前提是假设车端故障能够迅速而准确地得到诊断。

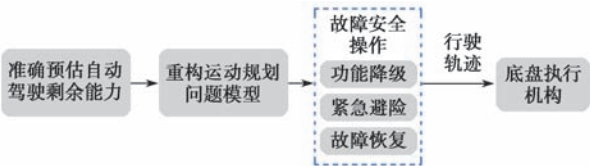


图 2 故障安全运动规划基本执行流程

Fig. 2 Basic execution process of fail-safe motion planning

正常工况下的运动规划方法主要包括几何方法、采样搜索方法、数值优化方法以及机器学习方法^[20-27]。故障安全运动规划仍旧依赖这些方法来完成求解任

务，但故障安全运动规划命题需额外考虑故障因素，继而增删约束条件或调整代价函数。

2 感知模块故障条件下的故障安全运动规划方法

本节将从感知能力受限和传感器损毁两个角度分析故障安全运动规划方法的研究现状。

2.1 感知能力受限

视野遮挡、感知不确定性或定位失准都将对车辆感知周围环境的范围产生限制，这些安全隐患易诱发行车事故。

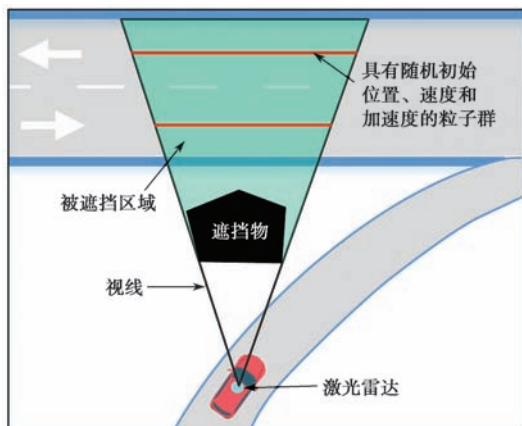
2.1.1 视野遮挡

视野遮挡是导致汽车安全事故的重要因素之一^[28]。国内一些低等级道路上的交通参与者路权意识淡漠，这增加了自动驾驶系统处理视野遮挡区域的难度^[29-30]。设计可解决视野遮挡问题的故障安全运动规划算法的关键在于，确定被遮挡区域并对其中隐藏的交通参与者进行合理推断、预测，据此构建风险量化模型，随后求解出可避免潜在风险的行车轨迹。推测被遮挡区域内信息的方法可分为以下两类：

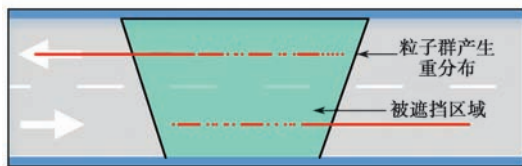
（1）粒子滤波算法

采用粒子滤波算法可对被遮挡区域内障碍物的分布及其状态作出可能性推测，据此规划出较为舒适的故障安全轨迹。如图 3(a) 所示，在交叉路口的道路中心线上铺设若干个具有随机初始速度和初始位置的粒子，然后赋予粒子以加速度并预测其运动^[31]；如图 3(b) 所示，粒子重分布后的状态（位置、速度、可视性等）是对被遮挡情况下未来环境演变的推测，根据该推测进行速度规划可有效防范被遮挡区域的风险。除对粒子的纵向运动进行模拟外，文献 [32] 通过给粒子随机指定横向位移来模拟车辆的宽度和

横向运动,将粒子分布状态与基于代价函数的运动规划方法相结合,从而实现故障安全轨迹风险的量化评估。为避免被遮挡区域的推测导致过于保守的行驶行为,文献[33]利用粒子滤波算法评估视野风险并将其与故障安全运动规划的代价函数相结合,具有更好视野的故障安全轨迹与粒子产生干涉的概率更低,故代价值也更低。该方法将倾向于对环境进行更多的探索以追求更高效的行驶轨迹。



(a) 粒子的初始化



(b) 推测的粒子状态重分布

图3 基于粒子滤波的盲区物体推测方法

Fig. 3 Inference method for the object in a blind region based on particle filter

(2) 增加虚拟的交通参与者

粒子滤波算法由于没有给出被遮挡区域可能发生最坏情况的假设,由此生成的故障安全轨迹仍旧存在碰撞风险^[34],而在被遮挡区域的边界处加入虚拟的动态交通参与者并对其运动做出保守估计将可以消除此类风险。虚拟的动态参与者如图4所示,虚拟汽车被假设以城市道路允许的最高车速(40 km/h)驶出被遮挡区域边界。



图4 基于虚构动态交通参与者的盲区物体推测方法

Fig. 4 Inference method for the object in a blind region based on virtual dynamic traffic participants

文献[35–36]提出,车辆在与虚拟的动态障碍物交会前应当保证能够紧急制动停车,由此可计算允许的最大安全速度并进行速度规划,该方法使得低速行驶的机器人可以安全应对被遮挡区域的风险。在处理虚拟交通参与者时,基于原路径进行速度规划,可生成安全、舒适的故障安全轨迹,但虚拟动态障碍物被假设以某一速度沿其车道行驶或做直线运动,仅适用于单车道、简单场景^[34, 37]。

在应对被遮挡区域的故障安全运动规划过程中,为了对虚拟交通参与者进行更真实的模型描述,文献[38–41]假设虚拟交通参与者将从视线边界处以一定的初速度和加速度向任意方向运动。文献[42]则采用基于集合的方法^[43]对虚拟车辆的运动进行更精准的建模,并结合主动预防碰撞策略规划故障安全轨迹,当被遮挡区域冲出其他车辆时可以及时减速、绕行。

城市路况下多种交通参与者类型(机动车、非机动车、行人等)可能并存,在故障安全运动规划中对被遮挡区域的信息进行推测时仅考虑汽车显然并不能够应对复杂多变的场景。文献[44]利用势场理论对虚拟行人进行建模,横穿马路的虚拟行人所产生的斥力势场将降低故障安全轨迹的速度,以至于当危险发生时车辆可及时制动,从而避免碰撞发生。文献[45]引入基于虚拟行人势场的代价函数,避免故障安全轨迹距离被遮挡区域边界过近。文献[46]认为被遮挡区域边界所处的位置决定虚拟交通参与者的类型,当遮挡区域边界位于人行道时,设置虚拟的行人而不是汽车显然是更合理的推测。

对被遮挡区域的过于保守推测会使通行效率降低。为了安全但不过分小心的应对被遮挡区域的风险,文献[47]将虚拟交通参与者不同轨迹的发生概率加入速度规划问题的代价函数中,并保证错误的概率估计仅会影响轨迹舒适性而不影响安全性,有利于提高故障安全轨迹的规划效率。文献[48]通过追踪相邻时刻被遮挡区域边界变化情况,对虚拟交通参与者的速度及姿态角等信息进行更为精准的估计,在感知能力受限的情况下充分发掘已知的环境信息以减少甚至消除对被遮挡区域不必要的保守描述,避免在处理被遮挡区域时过度谨慎。文献[49]基于“collision at rest”原则处理被遮挡区域风险,即若车辆能够在与虚拟交通参与者相撞前停车,则认为即便发生碰撞车辆承担的责任也不大。其轨迹拓展时的被遮挡区域风险评估如图5所示,风险评估过程中使用动态扩张的阴影区域推测虚拟交通参与者

的运动状态并允许规划轨迹与该区域相交，但必须保证在每一轨迹点处存在可躲避动态阴影区域的安全停车轨迹；同时，该方法在停车轨迹安全性的判定中，需考虑车辆对障碍物反应时间的影响，车辆反应速度越快，其行驶轨迹将更具侵略性。文献 [45] 提出“honking at rest”的概念，即确保先于紧急碰撞隐患的出现而鸣笛预警，从而降低紧急事故发生率并减轻自动驾驶车辆的事故责任。“collision at rest”与“honking at rest”旨在避免因规避潜在突发风险而规划出过于保守的运动轨迹。

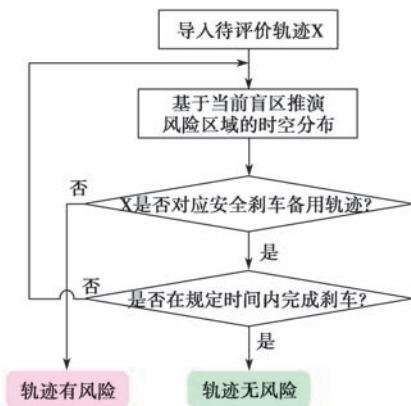


图 5 文献 [49] 提出的轨迹风险评价方案流程
Fig. 5 Risk assessment process of trajectories proposed by Ref. [49]

2.1.2 感知不确定性

现实环境中固有的传感器噪声、定位偏差及多帧数据融合偏差等因素会造成所感知到的障碍物状态存在不确定性，因此依据不确定的障碍物信息进行运动规划存在安全隐患。文献 [50] 利用多帧传感器感知数据结合卡尔曼滤波算法将凸多边形障碍物状态的不确定性用多元高斯分布表示，并在基于混合 A* 的故障安全运动规划中利用该分布和机会约束模型进行碰撞检测，将碰撞概率限制在给定范围内以保证节点扩展的安全性。由于考虑了障碍物数据的不确定性，该方法生成的故障安全路径将趋向于保守的障碍物绕行方式，以避免车辆驶入障碍物密集的区域。在人-车冲突场景中，行人的随机不确定性行为会使车辆存在碰撞风险，文献 [51] 基于马尔可夫模型^[52]描述行人的不确定状态，通过无迹变换^[53]估计不同避障轨迹的碰撞概率，并将该碰撞概率与稳定性、舒适性等指标相结合，可对故障安全轨迹的风险进行量化评估。

除了系统固有的感知不确定性以外，特定外部环境（扬尘、雨水等）也可能引起感知能力下降，从而使安全性受到威胁。为适应感知能力下降而带来的不确定性，文献 [54] 在可提供功能降级的容错系统架

构中实现故障安全运动规划，当故障监测模块探测到道路、天气等外部环境条件恶化等情况时，立即触发功能降级操作并修改运动规划参数，必要时可紧急停车。例如，在大雨天气情况下，传感器对环境识别能力下降，故障安全运动规划则禁止变道、超车的驾驶行为，以保证车辆的安全。

2.1.3 定位失准

在空旷环境或有高楼、树林、隧道等对定位信号严重遮挡等情况下，车辆定位可能发生严重失准，此故障将直接影响车辆行驶的安全性，甚至可能导致车辆冲撞障碍物。文献 [55] 对空旷或相似环境下车辆可定位性估计问题进行研究，并将量化的可定位性估计指标加入 A* 路径规划方法的代价函数中，使得自动驾驶车辆沿着规划路径行驶时可尽量避免由于定位失准而产生的行进轨迹混乱现象。文献 [56] 在不依赖高精度组合导航设备的情况下，使用基于强化学习的方法进行“端到端”的运动规划^[57]，该方法可实现从粗糙的参考路径点或低维局部障碍物信息到车轮转角的映射，通过在定位结果精度不高、跳变甚至定位信号完全缺失的环境中进行训练，该规划算法将具备应对定位失准的能力。

2.2 传感器损毁

文献 [58] 提出应当根据传感器硬件故障在不同场景下对自动驾驶功能的损害程度进行自适应性的故障安全运动规划。例如在高速公路行驶场景中，负责执行行人探测算法的硬件发生故障时，运动规划环节将不受影响并通过交互系统向驾驶员报告故障；如果相同故障发生在城市道路场景，那么该行人探测算法将在备份的处理器核心上以较低速率运行，同时运动规划环节将降低行驶速度。至今，在传感损毁条件下进行运动规划的研究工作相对稀少。

3 决策模块故障条件下的故障安全运动规划方法

现存的面向决策模块故障的运动规划方法可分为两类：被动紧急规避与主动防范碰撞。被动紧急规避策略是在碰撞即将发生时通过执行紧急制动或规避动作来尽可能避免碰撞事故。主动防范碰撞是在环境态势恶化初期通过提前采取保守行驶方案，从而避免车辆陷入紧急情境中。

3.1 被动紧急规避策略

基于被动紧急规避策略的故障安全运动规划方

法用于应对决策模块软件故障。具体而言,在车辆自动驾驶过程中,如果车辆只是简单地推测其他交通参与者未来的正常趋势,但对其潜在的异常行为及可能造成的后果不做任何预判,则自动驾驶行为将显得激进而不够慎重;一旦其他交通参与者的未来行为偏离预期,自动驾驶车辆将很可能陷入危险处境,此时车辆既定的正常运动规划问题不再有解,这会很自然地导致正常运动规划求解过程失败,即1.2节所提及的决策模块软件故障。由于车辆此刻已处于危险境地,车辆需要作出应激性的快速规避动作来应对。实现此类功能的故障安全运动规划方法包括人工势场算法、弹性带算法、模型预测控制算法、在线查表法以及采样搜索优化法。

3.1.1 人工势场法

人工势场法因其简单直观、规划速度快且易满足紧急避障算法实时要求的特点,在运动规划技术发展早期被用于为故障安全操作提供应激性紧急避障路径。

1986年,Khatib^[59]首次提出人工势场算法并将其用于机器人路径规划。人工势场算法原理如图6所示,目标点和障碍物分别对车辆产生引力和斥力;在引力与斥力叠加作用下,车辆在避障的同时趋向目标路径。人工势场算法原理直观、模型简单、消耗计算资源极少,因此作为一种紧急工况下的应激性避障约束方法具有计算速度极快的优势。在基本人工势场法的基础上,一些研究通过引入道路边界斥力势场^[60]或道路中线引力势场^[61],使得紧急避障路径远离道路边界或车辆尽可能沿目标车道中线行驶。

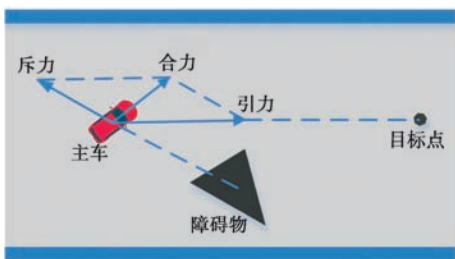


图6 基于人工势场的运动规划方法原理

Fig. 6 Principle of motion planning based on artificial potential field

虽然人工势场法计算响应较快,但其显著缺陷是易陷入局部最优解而无法进一步提升路径规划质量。在解空间之中,局部最优解处于斥力、引力平衡点,往往导致规划路径的过早收敛或局部振荡^[62]。文献[63]认为紧急避障运动规划的首要任务仍是躲避障碍物,因此去除目标引力势场的作用以避免紧急避障路径规划陷入局部极值;与此同时,周围障碍物的距离和自身车体运动方向等信息被综合起来,从而完善了对

障碍物斥力势场的建模过程。在距离相同的条件下,处于运动方向的障碍物的威胁度要高于非运动方向的,以避免紧急避障路径规划对障碍物反应过度。

3.1.2 弹性带算法

弹性带(elastic band)算法最早由Durbin和Willshaw^[64]提出,用以解决旅行商问题,后被广泛应用于机器人路径规划领域^[65]。弹性带算法将待规划的路径视为一条可灵活伸缩的弹性带,弹性带受到障碍物排斥且在自身伸长受到内部阻抗力,斥力与阻力平衡条件下的弹性带形态对应着形态平滑优美、长度较短的行车路径。与人工势场法类似,弹性带算法计算速度极快,因此适用于紧急规避运动规划任务^[66]。

文献[67]将弹性带算法引入到自动驾驶汽车的紧急避障路径规划问题解决方法中,通过三次样条曲线对生成的路径点列进行插值,从而获得符合车辆运动学规律的紧急避障路径。弹性带算法的缺陷在于弹性带的初始状态决定了最终结果的同伦类别,这意味着弹性带无法跨越障碍物,且被障碍物向着错误方向排斥至道路边界以外,或者陷入多重障碍物之间。为解决同伦类别关联的问题,文献[68]通过沿左右车道设置两条可选择的初始路径来确定多种同伦类别。文献[69]首先扩充备选弹性带数目, N 个障碍物的 2^N 种不同绕行方式分别有对应的弹性带,筛选出横向加速度最小的避障轨迹;并引入道路边界排斥力,以避免紧急规避运动规划的路径与道路边界相撞。

上述基于弹性带的紧急避障路径规划方法聚焦于确定道路行车的横向偏移量,未能充分利用车辆的全部横向纵向运动潜力。另外,车辆在高速行驶情况下急打方向盘容易发生甩尾及侧翻危险,因此在不考虑车辆非稳态动力学模型的前提下直接规划紧急规避路径存在安全隐患。针对这一问题,文献[70]为相邻弹性带节点赋予相同时间间隔,从而实现对转向和制动策略的同时规划,为车辆紧急避障提供更有力的安全保障。弹性带算法的其他改进策略已被应用于多车协同避障^[71]、高速紧急避障^[72-73]及行人避障^[74-75]等涉及故障安全的规划任务中。

3.1.3 模型预测控制算法

模型预测控制(model predictive control, MPC)是一种以滚动求解最优控制问题为特色的控制方法。相较其他古典控制律(例如比例-积分-微分控制^[76]等),MPC的特点是在滚动优化架构中求解一个简化的最优控制问题。这一特点使得MPC可在考虑车辆运动学或动力学特性的同时处理空间状态变量的各种约束,往往也被作为一种运动规划方法,体现了

一定的抗干扰鲁棒性^[77]。将 MPC 应用于车辆紧急避障路径规划,可获得符合车辆运动学约束且可靠的结果^[78-81]。

因 MPC 需要调用梯度优化方法求解一个经简化形成的二次规划 (quadratic program, QP) 问题,因此,相较人工势场法或弹性带方法,其计算速度往往更缓慢。为防止 MPC 方法的计算效率进一步降低,上述 QP 问题一般不会包含精细的避障约束,这会导致车身与障碍物之间存在碰撞隐患。为解决紧急避障路径规划任务中的上述问题,文献 [82] 引入以阶跃函数为基础的禁区边界惩罚函数,并根据车辆的尺寸确定禁区圆半径,若模型预测过程中某一时刻车辆质心落入禁区内,避障惩罚函数值将急剧增大,从而确保所生成的故障安全路径成功避开障碍物。

车辆在极限情况下紧急避障时,躲避障碍物与保持车辆稳定未必能够同时实现,因此当二者发生冲突时需调配优先级。文献 [83] 使用 BP 神经网络来动态决策目标函数中避障惩罚项和稳定性惩罚项的权重,当车辆存在碰撞风险时,避障惩罚项将被赋予较大权重以优先满足避障需求。文献 [84] 将避障条件和车辆稳定性条件作为 MPC 中的约束,并分别引入松弛变量予以软化,避免在避障和车辆稳定性约束两者发生冲突时发生求解失败^[85],在目标函数中被赋予更大权重的避障约束松弛因子将迫使故障安全路径违反车辆稳定性约束,从而保证避障。除紧急避障方案外,上述松弛方案旨在保障运动规划的成功率,这也是所鼓励的一种故障安全运动规划理念。

3.1.4 在线查表法

当决策模块发生故障的典型外部原因是环境发生突变时,其导致正常的运动规划命题不再有解,此时自动驾驶汽车通常处于危急的境地之中,这意味着故障安全运动规划方法必须在极短时间内形成应激性的紧急避险行车方案。除计算时效性之外,理想的故障安全运动规划方法必须充分考虑车辆的运动学/动力学规律,否则将生成一条不易被跟踪执行、无实际意义的避障轨迹。人工势场法、弹性带算法虽然计算实时性极强,但并未对车辆运动学规律显式建模,生成的路径未必易于跟踪;MPC 方法虽然能够体现车辆运动学甚至是动力学约束,但计算量较大,因此实时性较差。事先离线生成备选轨迹数据库并进行在线查表的方法有望同时满足故障安全运动规划的实时性和易跟踪性要求。

在以紧急驻车为目标的故障安全运动规划中,文献 [86-87] 对初始车速和停车点进行离散化采样枚

举后,采用计算最优控制方法离线生成数条“换道+减速停车”轨迹并存入数据库。在紧急情况发生时,从数据库中调取符合初始车速条件的轨迹进行在线碰撞检测和代价评估,筛选出最佳轨迹作为故障安全运动规划的结果。

3.1.5 采样搜索-优化算法

采样搜索-优化方法属于更加彻底的 MPC 方法,其首先采用采样搜索方法确定同伦类别,随后以热启动的方式实施计算最优控制,从而得到数值最优轨迹。该方法的优点在于可规划出符合车辆运动学约束、安全且舒适的轨迹,但其计算实时性低于 MPC 方法的。为保证实时求解故障安全停车轨迹,文献 [88] 将路径和速度规划解耦以简化运动规划计算复杂度;为避免速度规划问题引入精细碰撞约束而导致优化求解缓慢,通过混合 A* 算法在“位移-速度-时间”三维离散状态空间中采样搜索得到的粗糙结果来构建线性碰撞约束,使得速度规划问题转化为 QP 问题,从而得以快速求解。

3.2 主动预防碰撞策略

基于被动紧急规避策略的方法并未对周围环境恶化情况进行及时预判,因此可能将车辆引入决策模块难以处理的危险处境中,严重情况下甚至会使车辆进入不可避免的碰撞状态 (inevitable collision states, ICS)^[40, 89],即无论车辆执行何种轨迹,碰撞终将发生。基于主动预防碰撞策略的故障安全运动规划方法旨在对故障发生的隐患进行提前预判,从而提前采取规避风险的行动。

2016 年,基于主动预防碰撞策略的故障安全运动规划算法被首次提出^[90-91]。图 7 示出该算法在相邻两时刻 (t_i 和 t_{i+1}) 的规划过程。该算法在每个时刻采用基于计算最优控制方法生成名义轨迹和故障安全轨迹。名义轨迹仅对交通参与者的未来状态进行简单预估,该轨迹在较长时域 T_{h1} 内引导车辆正常行驶。故障安全轨迹对应较短时域 T_{h2} ,其基于计划轨迹 (名义轨迹前 t' 时间部分) 进行运动规划,以规避其他交通参与者的可达区域。该可达区域采用基于集合的预测方法^[43, 92]对交通参与者在运动能力范围内的所有可能行驶行为做出了保守估计,使得计划轨迹和故障安全轨迹的安全性得到保障。

主动预防碰撞策略的关键思路如图 7(b) 所示。在 t_{i+1} 时刻,只有同时存在合法的计划轨迹及其对应的故障安全轨迹时,车辆才被允许正常执行计划轨迹;否则决策模块将因存在故障隐患而触发故障安全

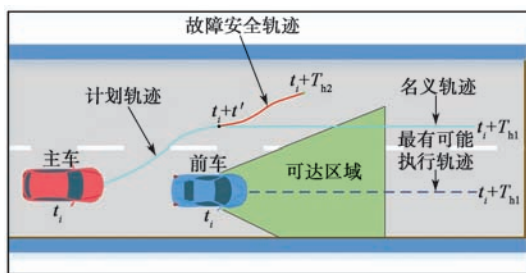
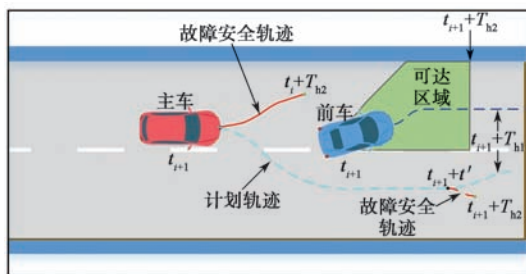
(a) t_i 时刻规划过程(b) t_{i+1} 时刻规划过程

图7 基于主动预防碰撞策略的故障安全运动规划

Fig. 7 Fail-safe motion planning based on active collision prevention strategy

机制,立即执行所计算的 t_i 时刻故障安全轨迹而紧急驻车,及时采取保守驾驶行为以避免决策模块处理复杂棘手的外部环境。该算法的缺点在于使用基于计算最优控制与基于集合的方法计算轨迹和可达区域,会导致计算量大且无法满足算法实时性要求^[93]。此外,若处于较为狭窄的道路环境中,对可达区域过于保守的估计将不利于行驶效率的提升。

文献[93-99]对文献[91-92]提出的故障安全运动规划算法不断改进。文献[93]采用凸优化理论^[94]将故障安全运动规划问题转化为横纵方向分别求解问题,由此得到的QP问题可被快速求解,从而有利于保证规划的实时性,但分别对横纵方向运动进行规划在一定程度上会牺牲运动规划的灵活性^[95-96]。文献[97]通过对交通参与者之间的相互关系进行分析,更合理地推测交通参与者的运动轨迹,从而修剪可达区域中的冗余部分,尽量避免因估计的可达区域过大而使得故障安全轨迹的规划显得保守。文献[98]在碰撞检测中,采用从简单到复杂的运动模型来逐步描述交通参与者的可达区域,并对前一时刻可达区域的计算结果进行复用,以降低对计算资源的消耗量,从而保证算法的实时性;采用任意时刻策略与主动预防碰撞策略相结合的方案,可在计算资源有限的情况下保证车辆的安全性。文献[99]考虑计算安全跟踪名义轨迹的最大时间窗口,在保证故障安全轨迹存在的前提下充分拓展计划轨迹的时域 t' ,从而降低计

算故障安全轨迹的频次,该方法适用于道路上行人、车辆数量较少且相距较远的情况。

4 控制模块故障条件下的故障安全运动规划方法

本章重点回顾控制模块故障情况下的运动规划方法,包括以制动停车为目的的速度规划方法和容错控制方法。需要注意的是,本章所涉及的一些容错控制方法在底盘执行机构失效时承担了部分运动规划的职责,因此将这些容错控制方法视为故障安全运动规划方法并加以分析。

文献[100-101]提出一种由备份的树莓派电脑提供计算能力的制动停车系统,在故障发生时,该系统假设前轮将被固定在某一角度,然后根据实时行驶路况求解最优的制动液压缸阀门位置序列,从而实现速度规划,避免因紧急停车而发生车辆失控和追尾等危险,并尽可能使停车位置远离危险区域(铁道口、十字路口及正常行驶的高速车道等)。

一些有关车辆容错控制的研究针对转向系统故障设计了具有容错功能的控制器,并基于故障信息重构车辆运动控制模型,为自动驾驶提供冗余行驶的能力,实际上承担了故障安全运动规划的工作。文献[102]在基于四轮转向的车辆发生前轮或者后轮转向系统故障时,改用后轮或前轮转向控制模型继续进行车辆运动控制,避免因盲目停车导致正常行驶的道路拥堵而发生事故。文献[103]针对轮内电机驱动车辆的转向系统故障提出一种利用差动转向^[104]控制四轮的转矩输出来实现车辆运动控制的方法。文献[105]在转向系统故障时利用差动制动产生减速度和偏航力矩,控制车辆的横纵向动态并引导车辆安全靠边停车。文献[106-110]则在转向系统故障时通过给前轴两轮施加不同的驱动力矩促使前轮发生转向,利用差动辅助转向^[111-112]实现车道保持和路径跟踪控制。

文献[113-114]对速度传感器故障时的纵向运动容错控制进行研究,观测故障信号的误差并对其进行补偿,以避免因输出错误控制量而导致追尾、翻车等事故,从而实现故障安全纵向运动规划。

5 发展展望

故障安全运动规划将成为自动驾驶产品品质控制的重要环节,以下问题在今后的研究中将值得关注:

(1) 对车辆故障进行准确、快速诊断是故障安全

运动规划方法得以顺利实现的重要前提。如何在故障无法被准确诊断的不确定性条件下设计合理的故障安全运动规划方案,这是一个具有现实意义的科学问题。

(2) 故障安全运动规划的能力边界需要被清晰地界定。随着智能车的不断发展,车辆的故障类型将增加,故障组合情况数目也会相应增加,而决策规划领域相关技术也在不断发展。因此,应设计一些相对稳定的原则与准则去判断某类故障是否适合由故障安全运动规划方法处理。另外,必须指出的是,故障安全运动规划方法的使用将会导致一些自动驾驶中的故障情况被掩盖,不利于自动驾驶车端模块的隐患排查。因此,故障安全运动规划适合被部署在一些相对成熟的自动驾驶车辆系统之中。

(3) 故障安全运动规划技术的发展应坚持兼顾多重因素,协调计算实时性与轨迹质量(即运动学/动力学可行性)之间的矛盾以及冗余安全性与行车高效性之间的矛盾。笔者认为,3.1.4节所述的在线查表方法是目前在工程实践中最有希望被应用的方案,它可以兼顾上述多重技术开发诉求。在沿袭该方案的基础上,针对性地研发专用处理器硬件也是值得重视的故障安全运动规划技术发展方向之一。

(4) 故障安全运动规划的结果对车辆系统以及外部环境未来影响的推演值得重视。例如,在车辆前轮偏转机构部分失效的故障条件下,特定类型的前轮偏转角度指令可能会造成偏转机构的进一步损害,导致车辆故障进一步演化;车辆在执行紧急规避动作时,也应充分考虑周围社会车辆的未来交互式应对行为。上述因素复杂程度极高,几乎无法直接构建于运动规划模型之中进行求解,因此应设计全新的计算架构来处理复杂的故障安全运动规划任务。

(5) 灯光与鸣笛是人类驾驶员操纵车辆运动过程中的交互式沟通方式,巧妙的灯光与鸣笛操作有望高效地替代被动的规避行驶动作。从长远来看,广义的故障安全运动规划应将灯光与鸣笛操作纳入决策变量范围之内。

(6) 在自动驾驶网联化发展的趋势下,利用车辆编队整体能力对编队中个别车辆出现故障的情况进行弥补是一项极具研究潜力的议题。

6 结语

自动驾驶运动规划技术在近年来已取得了长足进步,但故障安全运动规划方法仍值得深入探究。本文从自动驾驶车端感知、决策及控制三大模块发生故

障的角度对现有的故障安全运动规划方法进行了分类、梳理与分析。

随着自动驾驶技术的成熟及其产业化进程的推进,故障安全运动规划将在安全保障方面发挥愈发重要的作用。本文旨在为从事该领域研究的学者提供开展研究的参考,并呼吁更多学者与我们一道投身此研究领域。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委,中央网信办,科技部,等.关于印发《智能汽车创新发展战略》的通知[EB/OL]. (2020-02-10)[2021-11-22]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-02/24/content_5482655.htm.
National Development and Reform Commission, Office of the Central Cyberspace Affairs Commission, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, et al. Circular on the issuance of the national innovation and development strategy of intelligent vehicles[EB/OL]. (2020-02-10)[2021-11-22]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-02/24/content_5482655.htm.
- [2] 郑劫.以安全的名义[J].汽车观察,2018(4):31-32.
ZHENG J. In the name of safety[J]. Automotive observer, 2018(4): 31-32.
- [3] 周继红,蔡晗孜,杨傲,等.自动驾驶与交通安全[J].伤害医学(电子版),2019,8(1):41-46.
ZHOU J H, CAI H Z, YANG A, et al. Autonomous driving and traffic safety[J]. Injury Medicine(Electronic Edition), 2019, 8(1): 41-46.
- [4] 杜巧梅.事故频发陷入争议:高级别自动驾驶如何实现商业化?[N/OL].21世纪经济报道,2021-09-30[2021-11-22]. <http://www.sfccn.com/2021/9-30/zMMDE1MDhfMTY3MjMzMg.html>.
DU Q M. Frequent accidents and disputes: how to commercialize high-level automatic driving?[N/OL]. 21st Century Business Herald, 2021-09-30[2021-11-22]. <http://www.sfccn.com/2021/9-30/zMMDE1MDhfMTY3MjMzMg.html>.
- [5] ISHIGOOKA T, HONDA S, TAKADA H. Cost-effective redundancy approach for fail-operational autonomous driving system[C]//IEEE. 2018 IEEE 21st International Symposium on Real-Time Distributed Computing(ISORC). Singapore: IEEE, 2018: 107-115.
- [6] ISHIGOOKA T, OTSUKA S, SERIZAWA K, et al. Graceful degradation design process for autonomous driving system[M]//ROMANOVSKY A, TROUBITSYNA E, BITSCH F. Computer Safety, Reliability, and Security. Cham: Springer International Publishing, 2019: 19-34.
- [7] ZHANG Y M, JIANG J. Bibliographic review on reconfigurable fault-tolerant control systems[J]. Annual Reviews in Control, 2008, 32(2): 229-252.
- [8] SCHRATTER M, BOUTON M, KOCHENDERFER M J, et al. Pedestrian collision avoidance system for scenarios with occlusions[C]//IEEE. 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium(IV). Paris, France: IEEE, 2019: 1054-1060.
- [9] HAO C, SARWARI A, JIN Z J, et al. A hybrid GPU + FPGA system design for autonomous driving cars[C]//IEEE. 2019 IEEE

- International Workshop on Signal Processing Systems(SiPS). Nanjing, China: IEEE, 2019: 121-126.
- [10] HUANG T L, PAN H H, ZHANG C, et al. Path planning and fault-tolerant control based on resistance network for autonomous driving[C]//IEEE. 2020 4th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence(CVCI). Hangzhou, China: IEEE, 2020: 158-162.
- [11] JEONG Y, KIM K, KIM B, et al. Vehicle sensor and actuator fault detection algorithm for automated vehicles[C]//IEEE. 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium(IV). Seoul, Korea (South): IEEE, 2015: 927-932.
- [12] 石娟, 田晓笛, 王建培. 自动驾驶分级方法及测试技术[J]. 汽车工程师, 2018(9): 18-21.
- SHI J, TIAN X D, WANG J P. Automatic driving grading method and testing technology[J]. Automotive Engineer, 2018(9): 18-21.
- [13] 安晖, 路鹏飞, 宋娟, 等. 抓住高级别自动驾驶技术落地前的机遇窗口期[J]. 互联网经济, 2020(11): 36-39.
- AN H, LU P F, SONG J, et al. Seize the window of opportunity before the arrival of advanced autonomous driving technologies[J]. Digital Economy, 2020(11): 36-39.
- [14] 韩旭至. 自动驾驶事故的侵权责任构造——兼论自动驾驶的三层保险结构[J]. 上海大学学报(社会科学版), 2019, 36(2): 90-103.
- HAN X Z. The liability structure of automated driving-also on the three-layer insurance structure of automated driving vehicles[J]. Journal of Shanghai University(Social Sciences Edition), 2019, 36(2): 90-103.
- [15] 赵申豪. 自动驾驶汽车侵权责任研究[J]. 江西社会科学, 2018, 38(7): 207-218.
- ZHAO S H. Research on tort liability of autonomous driving vehicle[J]. Jiangxi Social Sciences, 2018, 38(7): 207-218.
- [16] 周治邦. 故障安全和故障安全系统概念[J]. 铁道学报, 2002, 24(4): 55-58.
- ZHOU Z B. On the concepts of fail-safety and fail-safe systems[J]. Journal of the China Railway Society, 2002, 24(4): 55-58.
- [17] SHINGO S, DILLON A P. A study of the Toyota production system: from an industrial engineering viewpoint[M]. Cambridge: Productivity Press, 1989: 21-27.
- [18] SINGH A P, NAGARAJAN A B, RAMKUMAR R. Reduce human error for designing the fixture using poka yoke[J]. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2014, 3(2): 367-371.
- [19] SAURIN T A, RIBEIRO J L D, VIDOR G. A framework for assessing poka-yoke devices[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2012, 31(3): 358-366.
- [20] 李柏, 张友民, 邵之江. 自动驾驶车辆运动规划方法综述[J]. 控制与信息技术, 2018(6): 1-6.
- LI B, ZHANG Y M, SHAO Z J. Motion planning methodologies for automated vehicles: a critical review[J]. Control and Information Technology, 2018(6): 1-6.
- [21] 余卓平, 李奕姗, 熊璐. 无人车运动规划算法综述[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(8): 1150-1159.
- YU Z P, LI Y S, XIONG L. A review of the motion planning problem of autonomous vehicle[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2017, 45(8): 1150-1159.
- [22] 高健博. 无人驾驶汽车运动规划方法研究综述[J]. 汽车工业研究, 2018(8): 37-42.
- GAO J B. A review of motion planning methods for driverless vehicles[J]. Auto Industry Research, 2018(8): 37-42.
- [23] 王富奎. 高动态环境下智能车局部路径规划研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- WANG F K. Research on local path planning of intelligent vehicle in high dynamic environment[J]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [24] 安林芳. 智能车辆自动驾驶路径规划研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- AN L F. Research on the path planning for automatic driving of intelligent vehicle[J]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [25] 修彩靖, 陈慧. 基于改进人工势场法的无人驾驶车辆局部路径规划的研究[J]. 汽车工程, 2013, 35(9): 808-811.
- XIU C J, CHEN H. A research on local path planning for autonomous vehicles based on improved APF method[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(9): 808-811.
- [26] LEI X Y, ZHANG Z A, DONG P F. Dynamic path planning of unknown environment based on deep reinforcement learning[J]. Journal of Robotics, 2018: 1-10.
- [27] KIM B, PINEAU J. Socially adaptive path planning in human environments using inverse reinforcement learning[J]. International Journal of Social Robotics, 2016, 8(1): 51-66.
- [28] 彭建德. 视野盲区对汽车驾驶员安全驾驶的影响[J]. 内燃机与配件, 2020(4): 252-253.
- PENG J D. The effect of blind area on safe driving of automobile driver[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020(4): 252-253.
- [29] LI B, LIU S S, TANG J, et al. Autonomous last-mile delivery vehicles in complex traffic environments[J]. Computer, 2020, 53(11): 26-35.
- [30] 袁泉, 李一兵, 郭榕. 用于统计与分析的汽车碰撞行人事故深入数据源[J]. 公路交通科技, 2008(5): 126-129.
- YUAN Q, LI Y B, GUO R. In-depth data source of vehicle-to-pedestrian accidents used in the statistic and analysis of accidents[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008(5): 126-129.
- [31] NARKSRI P, TAKEUCHI E, NINOMIYA Y, et al. Crossing blind intersections from a full stop using estimated visibility of approaching vehicles[C]//IEEE. 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference(ITSC). Auckland, New Zealand: IEEE, 2019: 2427-2434.
- [32] YU M Y, VASUDEVAN R, JOHNSON-ROBERSON M. Occlusion-aware risk assessment for autonomous driving in urban environments[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(2): 2235-2241.
- [33] WANG L G, LOPEZ C F, STILLER C. Generating efficient behaviour with predictive visibility risk for scenarios with occlusions[C]//IEEE. 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems(ITSC). Rhodes, Greece: IEEE, 2020: 1-7.
- [34] PONCELET R, VERROUST-BLONDET A, NASHASHIBI F. Safe geometric speed planning approach for autonomous driving through occluded intersections[C]//IEEE. 2020 16th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision(ICARCV). Shenzhen, China: IEEE, 2020: 393-399.

- [35] CHUNG W, KIM S, CHOI M, et al. Safe navigation of a mobile robot considering visibility of environment[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(10): 3941-3950.
- [36] SADOU M, POLOTSKI V, COHEN P. Occlusions in obstacle detection for safe navigation[C]//IEEE. IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Parma, Italy: IEEE, 2004: 716-721.
- [37] TAŞ Ö Ş, STILLER C. Limited visibility and uncertainty aware motion planning for automated driving[C]//IEEE. 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium(IV). Changshu, China: IEEE, 2018: 1171-1178.
- [38] BOURAINE S, FRAICHARD T, SALHI H. Provably safe navigation for mobile robots with limited field-of-views in dynamic environments[J]. Autonomous Robots, 2012, 32(3): 267-283.
- [39] BOURAINE S, FRAICHARD T, SALHI H. Provably safe navigation for mobile robots with limited field-of-views in unknown dynamic environments[C]//IEEE. 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Saint Paul, MN, USA: IEEE, 2012: 174-179.
- [40] BOURAINE S, FRAICHARD T, AZOUAOU O, et al. Passively safe partial motion planning for mobile robots with limited field-of-views in unknown dynamic environments[C]//IEEE. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA). Hong Kong, China: IEEE, 2014: 3576-3582.
- [41] BOURAINE S, FRAICHARD T, SALHI H. Relaxing the inevitable collision state concept to address provably safe mobile robot navigation with limited field-of-views in unknown dynamic environment[C]//IEEE. 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2011: 2985-2991.
- [42] ORZECOWSKI P F, MEYER A, LAUER M. Tackling occlusions & limited sensor range with set-based safety verification[C]//IEEE. 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems(ITSC). Maui, HI, USA: IEEE, 2018: 1729-1736.
- [43] ALTHOFF M, MAGDICI S. Set-based prediction of traffic participants on arbitrary road networks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2016, 1(2): 187-202.
- [44] MATSUMI R, RAKSINCHAROENSAK P, NAGAI M. Study on autonomous intelligent drive system based on potential field with hazard anticipation[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2015, 27(1): 5-11.
- [45] LI B, ACARMAN T, ZHANG Y M, et al. Occlusion-aware on-road autonomous driving: a path planning method in combination with honking decision making[C]//33rd Chinese Control and Decision Conference(CCDC). 2021: 169-174.
- [46] KOSCHI M, ALTHOFF M. Set-based prediction of traffic participants considering occlusions and traffic rules[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2021, 6(2): 249-265.
- [47] NAUMANN M, KONIGSHOF H, LAUER M, et al. Safe but not overcautious motion planning under occlusions and limited sensor range[C]//IEEE. 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium(IV). Paris, France: IEEE, 2019: 140-145.
- [48] NEEL G, SARIPALLI S. Improving bounds on occluded vehicle states for use in safe motion planning[C]//IEEE. 2020 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics(SSRR). Abu Dhabi, United Arab Emirates: IEEE, 2020: 268-275.
- [49] NAGER Y, CENSI A, FRAZZOLI E. What lies in the shadows? Safe and computation-aware motion planning for autonomous vehicles using intent-aware dynamic shadow regions[C]//IEEE. 2019 International Conference on Robotics and Automation(ICRA). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2019: 5800-5806.
- [50] 何滨兵, 娄静涛, 齐尧, 等. 不确定性因素下基于机会约束的智能车路径规划算法[J]. 军事交通学院学报, 2020, 22(10): 81-89.
- HE B B, LOU J T, QI Y, et al. Intelligent vehicle path planning algorithm based on chance constraint under uncertainty[J]. Journal of Military Transportation University, 2020, 22(10): 81-89.
- [51] 黄智, 何颖, 刘象祎, 等. 考虑过街行人运动不确定性的人—车碰撞伤害评估[J]. 汽车工程, 2018, 40(1): 28-33.
- HUANG Z, HE Y, LIU X Y, et al. Assessment of pedestrian injuries in vehicle-pedestrian collision with consideration of pedestrian movement uncertainty in road crossing[J]. Automotive Engineering, 2018, 40(1): 28-33.
- [52] JAYANT N. A first-order Markov model for understanding delta modulation noise spectra[J]. IEEE Transactions on Communications, 1978, 26(8): 1316-1318.
- [53] BERTHELOT A, TAMKE A, DANG T, et al. Handling uncertainties in criticality assessment [C]//IEEE. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium(IV). Baden-Baden, Germany: IEEE, 2011: 571-576.
- [54] RESCHKA A, BÖHMER J R, NOTHDURFT T, et al. A surveillance and safety system based on performance criteria and functional degradation for an autonomous vehicle[C]//IEEE. 2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2012: 237-242.
- [55] 刘佳浩. 基于可定位性估计的无人驾驶汽车路径规划算法优化设计[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- LIU J H. Optimization design of autonomous vehicle path planning algorithm based on localizability estimation[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [56] 王通. 基于强化学习的智能车低成本导航[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- WANG T. Low-cost navigation based on reinforcement learning for autonomous vehicles[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [57] PFEIFFER M, SCHAEUBLE M, NIETO J, et al. From perception to decision: a data-driven approach to end-to-end motion planning for autonomous ground robots[C]//IEEE. 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA). Singapore: IEEE, 2017: 1527-1533.
- [58] KIM J, RAJKUMAR R, JOCHIM M. Towards dependable autonomous driving vehicles: a system-level approach[J]. ACM SIGBED Review, 2013, 10(1): 29-32.
- [59] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[C]//IEEE. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation. St. Louis, MO: IEEE, 1985: 500-505.
- [60] WAHID N, ZAMZURI H, AMER N H, et al. Vehicle collision avoidance motion planning strategy using artificial potential field

- with adaptive multi-speed scheduler[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2020, 14(10): 1200-1209.
- [61] 唐志荣. 基于危险势能场的车辆转向避撞路径规划与跟踪研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- TANG Z R. Research on path planning and path tracking for vehicle collision avoidance by steering control based on dangerous potential field[D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [62] 范玉龙, 黄波, 周仟, 等. 基于改进人工势场法的小车避障路径规划研究[J]. 软件导刊, 2021, 20(7): 38-42.
- FAN Y L, HUANG B, ZHOU Q, et al. Research on vehicle obstacle avoidance path planning based on improved artificial potential field method[J]. Software Guide, 2021, 20(07): 38-42.
- [63] 刘大伟. 移动机器人自主避碰与学习方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- LIU D W. Research on autonomous collision avoidance and learning method for mobile robot[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [64] DURBIN R, WILLSHAW D. An analogue approach to the travelling salesman problem using an elastic net method[J]. Nature, 1987, 326(6114): 689-691.
- [65] QUINLAN S, KHATIB O. Elastic bands: connecting path planning and control[C]//IEEE. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Atlanta, GA, USA: IEEE, 1993: 802-807.
- [66] QUINLAN S. Real-time modification of collision-free paths[D]. Stanford: Stanford University, 1995.
- [67] HILGERT J, HIRSCH K, BERTRAM T, et al. Emergency path planning for autonomous vehicles using elastic band theory[C]//IEEE. 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics(AIM 2003). Kobe, Japan: IEEE, 2003: 1390-1395.
- [68] ARARAT Ö, GÜVENÇ B A. Development of a collision avoidance algorithm using elastic band theory[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 8520-8525.
- [69] SATTEL T, BRANDT T. Ground vehicle guidance along collision-free trajectories using elastic bands[C]//IEEE. Proceedings of the 2005, American Control Conference. Portland, OR, USA: IEEE, 2005: 4991-4996.
- [70] KELLER M, HOFFMANN F, HASS C, et al. Planning of optimal collision avoidance trajectories with timed elastic bands[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2014, 47(3): 9822-9827.
- [71] FRESE C, BEYERER J. A comparison of motion planning algorithms for cooperative collision avoidance of multiple cognitive automobiles[C]//IEEE. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium(IV). Baden-Baden, Germany: IEEE, 2011: 1156-1162.
- [72] SONG X L, CAO H T, HUANG J. Vehicle path planning in various driving situations based on the elastic band theory for highway collision avoidance[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2013, 227(12): 1706-1722.
- [73] 曹昊天, 宋晓琳, 黄江. 基于弹性绳理论的自主车辆防碰撞的路径规划[J]. 汽车工程, 2014, 36(10): 1230-1236.
- CAO H T, SONG X L, HUANG J. Path planning of autonomous vehicle for collision avoidance based on elastic band theory[J]. Automotive Engineering, 2014, 36(10): 1230-1236.
- [74] GELBAL S Y, ARSLAN S, WANG H A, et al. Elastic band based pedestrian collision avoidance using V2X communication[C]//IEEE. 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium(IV). Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2017: 270-276.
- [75] GELBAL S Y, AKSUN-GUVENC B, GUVENC L. Collision avoidance of low speed autonomous shuttles with pedestrians[J]. International Journal of Automotive Technology, 2020, 21(4): 903-917.
- [76] ÅSTRÖM K J, HÄGGLUND T. The future of PID control[J]. Control Engineering Practice, 2001, 9(11): 1163-1175.
- [77] 任玥, 郑玲, 张巍, 等. 基于模型预测控制的智能车辆主动避撞控制研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(4): 404-410.
- REN Y, ZHENG L, ZHANG W, et al. A study on active collision avoidance control of autonomous vehicles based on model predictive control[J]. Automotive Engineering, 2019, 41(4): 404-410.
- [78] 邹旭东, 贾志强, 张丽霞. 基于模型预测控制的智能车辆紧急避障系统[J]. 青岛理工大学学报, 2020, 41(6): 25-32.
- ZOU X D, JIA Z Q, ZHANG L X. Intelligent vehicle emergency obstacle avoidance system based on model predictive control[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2020, 41(6): 25-32.
- [79] 许媛. 汽车高速状态下紧急避障系统研究[J]. 机械设计与制造, 2019(9): 231-235.
- XU Y. Study on emergency obstacle avoidance system of high-speed vehicle[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(9): 231-235.
- [80] 邓海鹏, 麻斌, 赵海光, 等. 自动驾驶车辆紧急避障的路径规划与轨迹跟踪控制[J]. 兵工学报, 2020, 41(3): 585-594.
- DENG H P, MA B, ZHAO H G, et al. Path planning and tracking control of autonomous vehicle for obstacle avoidance[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(3): 585-594.
- [81] WERLING M, LICCARDO D. Automatic collision avoidance using model-predictive online optimization[C]//IEEE. 2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control(CDC). Maui, HI, USA: IEEE, 2012: 6309-6314.
- [82] 花晓峰, 段建民, 田晓生. 基于禁区惩罚函数和 MPC 倍增预测的车辆避障研究[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(15): 131-138.
- HUA X F, DUAN J M, TIAN X S. Research on vehicle obstacle avoidance based on restricted areas penalty function and MPC prediction multiplication[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(15): 131-138.
- [83] 胡珍宇. 基于模型预测控制的智能车辆避障控制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- HU Z Y. Obstacle avoidance control strategy of autonomous vehicle based on model predictive control[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [84] 胡均平, 曾武杨, 李勇成. 基于 MPC 下车辆自主避障算法[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(7): 146-149.
- HU J P, ZENG W Y, LI Y C. Algorithm of autonomous obstacle avoidance based on MPC[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(7): 146-149.
- [85] LINIGER A, DOMAHIDI A, MORARI M. Optimization-based autonomous racing of 1:43 scale RC cars[J]. Optimal Control Applications and Methods, 2015, 36(5): 628-647.

- [86] SVENSSON L, MASSON L, MOHAN N, et al. Safe stop trajectory planning for highly automated vehicles: an optimal control problem formulation[C]//IEEE. 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium(IV). Changshu, China: IEEE, 2018: 517-522.
- [87] KROOK J, SVENSSON L, LI Y C, et al. Design and formal verification of a safe stop supervisor for an automated vehicle[C]//IEEE. 2019 International Conference on Robotics and Automation(ICRA). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2019: 5607-5613.
- [88] WANG L G, WU Z K, LI J K, et al. Real-time safe stop trajectory planning via multidimensional hybrid A*-algorithm[C]//IEEE. 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems(ITSC). Rhodes, Greece: IEEE, 2020: 1-7.
- [89] FRAICHARD T, ASAMA H. Inevitable collision states. A step towards safer robots? [C]//IEEE. 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003). Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2003: 388-393.
- [90] MAGDICI S, ALTHOFF M. Fail-safe motion planning of autonomous vehicles[C]//IEEE. 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems(ITSC). Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2016: 452-458.
- [91] PEK C, ALTHOFF M. Ensuring motion safety of autonomous vehicles through online fail-safe verification[C]//Robotics Science and Systems-Pioneers Workshop. 2019.
- [92] ALTHOFF M, HEB D, GAMBERT F. Road occupancy prediction of traffic participants[C]//IEEE. 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems(ITSC 2013). The Hague, Netherlands: IEEE, 2013: 99-105.
- [93] PEK C, ALTHOFF M. Computationally efficient fail-safe trajectory planning for self-driving vehicles using convex optimization[C]//IEEE. 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems(ITSC). Maui, HI, USA: IEEE, 2018: 1447-1454.
- [94] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 7-10.
- [95] PEK C, KOSCHI M, ALTHOFF M. An online verification framework for motion planning of self-driving vehicles with safety guarantees[C]//Proceedings of the Automatisiertes und Vernetztes Fahren(AAET). 2019: 260-274.
- [96] PEK C, ALTHOFF M. Fail-safe motion planning for online verification of autonomous vehicles using convex optimization[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2021, 37(3): 798-814.
- [97] KOSCHI M, ALTHOFF M. Interaction-aware occupancy prediction of road vehicles[C]// Proceedings of the 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Yokohama, Japan: IEEE, 2017: 1-8.
- [98] GRUBER F, ALTHOFF M. Anytime safety verification of autonomous vehicles[C]//IEEE. 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems(ITSC). Maui, HI, USA: IEEE, 2018: 1708-1714.
- [99] MAGDICI S, YE Z Z, ALTHOFF M. Determining the maximum time horizon for vehicles to safely follow a trajectory[C]//IEEE. 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems(ITSC). Yokohama, Japan: IEEE, 2017: 1-7.
- [100] BEYERER J, DOLL J, DUERR F, et al. General fail-safe emergency stopping for highly-automated vehicles[C]//Proceedings of the of the Tagung Automatisiertes Fahren. 2019.
- [101] DUERR F, ZIEHN J, KOHLHAAS R, et al. Realtime global optimization of a fail-safe emergency stop maneuver for arbitrary electrical/ electronical failures in automated driving[C]//IEEE. 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems(ITSC). Rhodes, Greece: IEEE, 2020: 1-8.
- [102] WANG D W, PHAM M, LOW C B, et al. Development and implementation of a fault-tolerant vehicle-following controller for a four-wheel-steering vehicle[C]//IEEE. 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, China: IEEE, 2006: 13-18.
- [103] WANG Y L, ZONG C F, GUO H Y, et al. Fault-tolerant path-following control for in-wheel-motor-driven autonomous ground vehicles with differential steering[J]. Asian Journal of Control, 2020, 22(3): 1230-1240.
- [104] KUSLITS M, BESTLE D. Modelling and control of a new differential steering concept[J]. Vehicle System Dynamics, 2019, 57(4): 520-542.
- [105] BOUDALI M, ORJUELA R, BASSET M, et al. Emergency autonomous vehicle guidance under steering loss[C]//IEEE. 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium(IV). Changshu, China: IEEE, 2018: 2078-2083.
- [106] KLUMP M, JONASSON M, LAINE L, et al. Trends in vehicle motion control for automated driving on public roads[J]. Vehicle System Dynamics, 2019, 57(7): 1028-1061.
- [107] HU C, QIN Y C, CAO H T, et al. Lane keeping of autonomous vehicles based on differential steering with adaptive multivariable super-twisting control[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 125: 330-346.
- [108] HU C, WANG R R, YAN F J, et al. Robust composite nonlinear feedback path-following control for independently actuated autonomous vehicles with differential steering[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016, 2(3): 312-321.
- [109] HU C, WANG R R, YAN F J, et al. Differential steering based yaw stabilization using ISMC for independently actuated electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(2): 627-638.
- [110] WANG R R, JING H, HU C, et al. Robust H_∞ output-feedback yaw control for in-wheel motor driven electric vehicles with differential steering[J]. Neurocomputing, 2016, 173(Part 3): 676-684.
- [111] WANG J, WANG Q, JIN L, et al. Independent wheel torque control of 4WD electric vehicle for differential drive assisted steering[J]. Mechatronics, 2011, 21(1): 63-76.
- [112] WANG J N, LUO Z, WANG Y, et al. Coordination control of differential drive assist steering and vehicle stability control for Four-Wheel-Independent-drive EV[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(12): 11453-11467.
- [113] BOUKHARI M R, CHAIBET A, BOUKHNIFER M, et al. Proprioceptive sensors' fault tolerant control strategy for an autonomous vehicle[J]. Sensors, 2018, 18(6): 1893.
- [114] BOUKHARI M R, CHAIBET A, BOUKHNIFER M, et al. Two longitudinal fault tolerant control architectures for an autonomous vehicle[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2019, 156: 236-253.