



基于感通算融合的导轨式自动驾驶系统 —— 无线虚拟导轨

周一青^{1,2,3*}, 王露^{1,2,3}, 原进宏⁴, 石晶林^{1,2,3}, 赵登攀⁵

1. 中国科学院计算技术研究所处理器芯片全国重点实验室, 北京 100190, 中国

2. 中国科学院计算技术研究所移动计算与新型终端北京市重点实验室, 北京 100190, 中国

3. 中国科学院大学, 北京 100049, 中国

4. School of Electrical Engineering and Telecommunications, University of New South Wales, Sydney NSW 2052, Australia

5. 中国人民解放军某部队, 日喀则 858600, 中国

* 通信作者. E-mail: zhoyuqing@ict.ac.cn

收稿日期: 2022-07-27; 修回日期: 2022-10-07; 接受日期: 2022-11-24; 网络出版日期: 2023-06-14

国家自然科学基金 (批准号: U21A20449) 资助项目

摘要 融合感知、通信、计算技术的自动驾驶, 其重要任务是实现高安全和高效率的车辆调度, 但目前单车和联网两种自动驾驶方案还难以保障这两方面性能. 借鉴轨道交通的强控制性, 基于感通算融合构建的导轨式自动驾驶系统, 即无线虚拟导轨, 是实现安全和高效自动驾驶的一种潜在方案. 无线虚拟导轨中, 系统统一为车辆规划行车轨迹和控制策略, 即虚拟导轨, 通过移动网络实时引导车辆沿虚拟导轨行驶. 本文给出了无线虚拟导轨的系统架构, 介绍了各级功能与组成, 综述了系统实现的三大关键技术: 集中式分级管控技术、高可靠低时延无线通信技术和高精度车辆定位技术. 针对高精度车辆定位技术, 本文综述了 5 种定位实现方案, 及定位器件部署策略和适用场景. 无线虚拟导轨有望实现安全高效的自动驾驶, 为未来车辆自动驾驶发展提供参考.

关键词 自动驾驶, 感通算融合, 无线虚拟导轨, 集中式分级管控, 高可靠低时延通信, 高精度定位

1 引言

随着车辆普及, 其带来的交通事故和交通阻塞问题日益突出. 调查显示, 全球交通事故年均死亡人数高达 135 万人^[1], 而交通事故的主要原因是驾驶员不规范驾驶或操作失误^[2]. 此外, INRIX 和高德地图交通数据分析统计结果表明, 全球大城市中驾驶员人均年交通等待时间超过 90 小时, 全球交通阻塞每年造成的经济损失超过 1000 亿美元^[3]. 而交通阻塞的主要原因是各驾驶员仅从个体利益出发

引用格式: 周一青, 王露, 原进宏, 等. 基于感通算融合的导轨式自动驾驶系统 —— 无线虚拟导轨. 中国科学: 信息科学, 2023, 53: 1050–1077, doi: 10.1360/SSI-2022-0259
Zhou Y Q, Wang L, Yuan J H, et al. Autonomous driving with virtual rail – a wireless tracked and controlled self-driving vehicle system based on the integration of communication, sensing, and computing (in Chinese). Sci Sin Inform, 2023, 53: 1050–1077, doi: 10.1360/SSI-2022-0259

独立调度各车辆,交通系统不能实现交通资源整体的时空优化调度^[4].与依赖驾驶员的人工驾驶不同,自动驾驶是基于车体和道路设施配置的各类传感器、控制器、通信模块和计算设备,构造感通算融合的车辆控制信息系统.自动驾驶系统中,根据车辆和道路设施对环境和车体状态的感知,评估当前车辆行驶状态,并根据车辆行驶任务决策出下一个行车状态.随后,通信模块传递计算设备指令,最终控制车辆机械器件,使车辆按计划自主地在道路上行驶.自动驾驶有望减少交通事故、提高交通资源调度效率、解放车辆驾驶人力资源,是未来车辆技术发展重要方向.

现有综述关注的自动驾驶方案可分为两类,一类是基于车载独立感知和计算的单车自动驾驶^[5,6],另一类是基于无线通信的联网自动驾驶^[7~10].单车自动驾驶以谷歌 Waymo 开发的系统为代表^[11],仅依靠车身的传感器和计算单元进行感知和决策,并进行相应车辆控制,外部系统仅提供起点、终点和地图信息.自动驾驶的感知包括车辆运动状态和道路环境等多方面的感知,决策包括轨迹规划和车辆运动状态设置等复杂运算,控制包括车辆方向盘、油门和刹车等的控制.由于单车自动驾驶的车辆可安装的感知传感器和决策计算单元数量少,感知范围窄,计算能力弱,实时感知范围和计算能力受限于车辆本身^[5].2022年,特斯拉自动驾驶车辆发生的车祸中,有两起事故是车辆感知和识别能力受限造成的.一起原因是车辆无法识别道路上的牵引拖车,另一起原因是车辆无法识别路边植被和道路边界,两起车祸均有人丧生^[12].此外,单车智能的 Uber 汽车也因车辆感知能力受限,而发生过多起车祸^[13].总的来说,单车自动驾驶仅配置了车辆感知和计算设备,不涉及道路基础设施改造,其经济投入和工程量少,但感知和计算能力受限,难以解决目前道路交通安全难题.

另一方面,联网自动驾驶以百度 Apollo 开发的自动驾驶系统为代表^[14],借助多种路边设施和无线通信网络^[15~19],实现车网互通和车路协同.同时,车辆外围感知器件和远程计算设备可协助车辆完成环境感知和轨迹决策,扩大自动驾驶车辆的感知范围,增强了自动驾驶车辆的计算能力^[20~22].因此,与单车自动驾驶相比,联网自动驾驶在减少交通事故,提高交通资源调度效率方面更具潜力.但是,现有联网自动驾驶车辆以优先完成各车行程任务为目标,而系统整体交通效率的提升需联合调度多车行驶轨迹.在多车联合控制道路场景中,系统需同时确定多车行驶轨迹,车辆轨迹控制流程扩展至多车.此场景下,车辆轨迹标定间距、轨迹调整时间、跟车距离等参数精度增加,则多车联合控制系统的分析和计算复杂度大大增加.为保障多车联合控制系统的安全性和高效性,车辆轨迹标定间距、轨迹调整时间、跟车距离等参数精度增加,同时系统需大幅提升对车辆状态的感知和控制精度.比如,多车联合控制的车辆编队场景中,为提升交通吞吐量,系统应尽可能缩小相邻车辆间距,如低至米级.为保障车队行驶安全性,车辆定位精度要求高,且当车辆遇突发事故需在 10 ms 以内感知当前行车状态,并调整行车控制指令^[23].可见,在感知中,车辆定位准确度和实时性对交通安全性保障和应急响应至关重要,协议标准中指出多车联合控制下需达到厘米级定位精度和毫秒级定位时延^[24,25].但目前的联网自动驾驶系统还无法达到上述指标,如广泛使用的 GPS、激光即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)或视觉 SLAM 等定位技术分别因城市高楼密集、阴雨雾霾天气和道路光线昏暗的问题,定位精度仅能达到米级^[26]或分米级^[27,28].且激光和视觉 SLAM 定位技术每秒处理数据量大,定位时延达上百毫秒^[29].由此,在当前的联网自动驾驶中,车辆运动状态的控制流程和感知性能均难以达到多车联合调度的要求,为提升交通安全和效率,自动驾驶技术方案亟需改进.

相比之下,轨道交通多车联合控制的安全性和效率更高.比如地铁,同轨道列车间距保持在 200~400 m 之间,相邻发车间隔为 90 s 左右,按统一时间表调度列车.列车制动时,基于精确的感知和控制,实现的停车位置误差低于 30 cm,停车时延误差低于 0.5 s^[30,31].与道路交通自动驾驶方案相比,列车间距和位置的控制更准确,在保证安全的前提下,尽可能提高系统运行效率.这主要得益于轨道交通采用专用物理轨道引导列车行驶,实行全封闭管理.一方面,系统可严格地按时间表集中式调度所有

列车, 实现全局车辆的统筹调度. 另一方面, 封闭式环境中, 传感器部署便捷, 可准确感知列车在轨道上的物理状态, 物理钢轨上列车行进控制的机械误差小, 如列车行进横向误差为 $100\ \mu\text{m}$ 左右^[32], 控制性能提升. 轨道交通基于规划表数据 (包含线路时间表和列车调度表等), 利用感知、通信、计算和控制等技术, 实现内外两环的列车行驶控制. 其中, 外环主要面向全局轨道交通的宏观调控, 而内环主要面向各辆列车行驶的微观调控^[33~36]. 因此, 与道路交通单车和联网自动驾驶相比, 轨道交通在列车运行的多车物理位置、行驶路线和时序等方面均具有强控制特性. 虽然轨道交通建设成本大、建设周期长、调度灵活性差, 但其在准时性、安全性、高效性和大运力等方面更具有优势.

现有自动引导车 (automated guided vehicle, AGV) 的研发参考了轨道交通的物理引导特性, 在指定道路周围部署信息引导器件, 如射频识别 (radio frequency identification, RFID) 标签、磁钉或二维码, 车载传感器感知道路引导器件产生的反射电磁场、磁场或反射光的强度和特点, 确定车辆位置, 实现灵活无接触的车辆定位. AGV 基于信息引导器件确定车辆位置, 随后进行车辆控制, 消除了轨道交通物理铁轨的约束, 实现车辆的虚拟引导. 因此, AGV 兼顾车辆控制的灵活性、安全性和高效性. AGV 系统由自由移动车辆、路线导引子系统、控制管理子系统、通信子系统和辅助子系统 5 部分组成^[37]. 目前的 AGV 多用于小区域内的工业生产和仓储物流传输场景中, 在不同应用场景中 AGV 的物品承载方式和信息引导方式有所差别, 其中信息引导方式包括^[38~40]: 磁导航 (磁钉或磁条)^[41]、通电线电磁导航、激光反射板导航^[42]、视觉图标导航 (二维码)^[43~46]、RFID 导航等. 结合自动驾驶灵活引导和轨道交通精确感知及控制, AGV 系统在封闭静态环境中能实现多车联合调度, 得到了较好的应用. 但是, 在开放时变性强的道路环境中, 因 AGV 系统器件的感知能力受限, 难以感知道路环境变化, 如路面出现遮挡物遮挡了道路信息引导器件, 或是道路出现障碍物阻挡车辆前行. 此时, 车辆感知精度下降, 系统无法检测实际路况和及时调整车辆行驶路线, 因此 AGV 系统在开放时变性强的道路交通环境中的应用还有待完善^[47~52].

考虑到现有单车自动驾驶感知范围局限于车辆四周, 联网自动驾驶控制流程和感知性能无法达到多车联合控制要求, 而 AGV 系统在开放时变性强的道路中应变能力差, 为提升自动驾驶中多车联合调度的安全性和高效性, 本文提出一种“感通算融合”的导轨式自动驾驶系统 — 无线虚拟导轨 (autonomous driving with virtual rail, ADWVR). 系统组成如图 1 所示, 其基本思想是基于多种定位技术, 在道路上多位置标识导轨点 (guiding point), 准确标识实际地理位置, 在此基础上部署信息化道路, 以实时准确感知和控制车辆状态, 实现多车联合调度. 车辆利用无线通信技术将位置等感知信息传递到管控设备, 管控设备统一对道路交通信息进行计算分析, 将各车辆行驶轨迹规划为多个导轨点组成的虚拟导轨 (virtual rail). 虚拟导轨不仅指示车辆沿导轨点行进的轨迹, 还指示车辆在导轨点位置应具备的物理状态, 如速度、加速度、方向等信息. 车辆接收管控设备下发的虚拟导轨信息, 并参考感知的物理状态信息, 控制加减速和转向等行车状态, 实现导轨式行驶. 无线虚拟导轨融合感知、通信、计算技术, 可实现逼近轨道交通的安全性和高效性, 又不失道路交通的灵活性. 参考无线虚拟导轨, 打造下一代道路交通自动驾驶系统, 有望解决城市交通事故频发、拥堵严重、运行效率低的痛点.

2 无线虚拟导轨系统架构与关键技术

2.1 系统架构与工作流程

无线虚拟导轨系统架构如图 1 所示, 包括全局管控云、局部移动边缘计算 (mobile edge computing, MEC) 平台^[53~55]、无线引导车辆和信息化道路, 简称云、平台、车和路四级. 其中全局管控云和局部

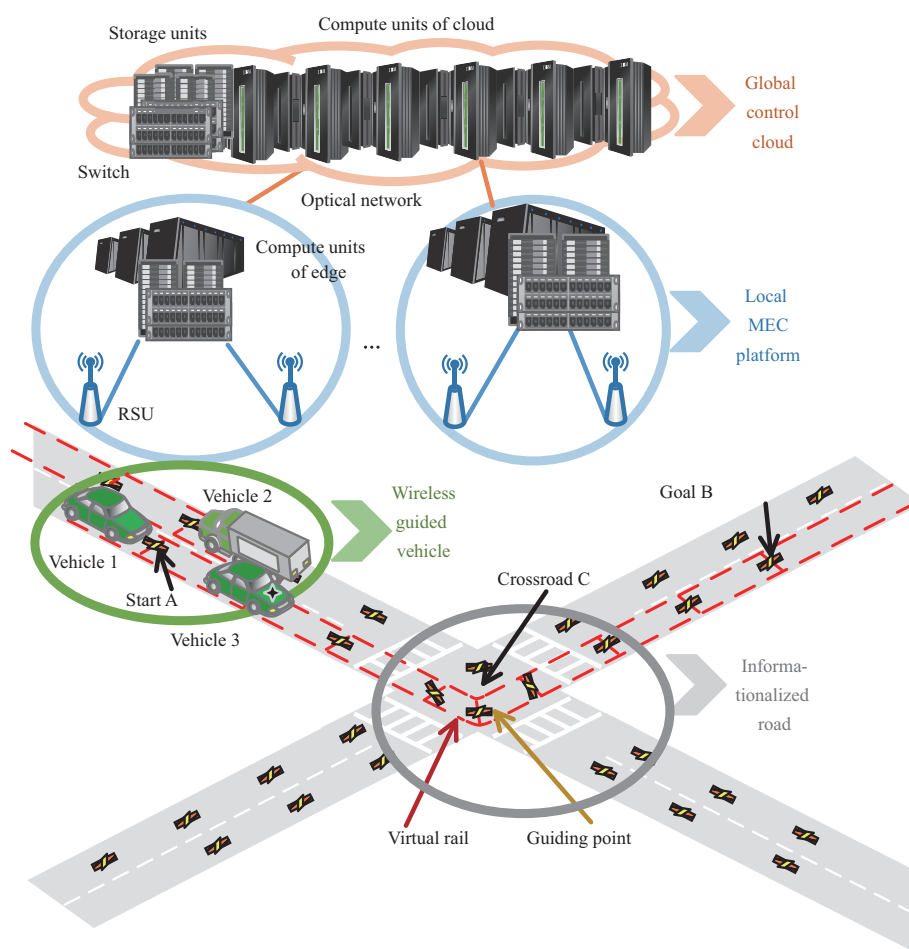


图 1 (网络版彩图) 无线虚拟导轨系统架构

Figure 1 (Color online) The architecture of wireless tracked and controlled automatic system

MEC 平台的管控范围受时延指标限制: 车辆与全局管控云间的信息处理时延, 主要受限于 20 ms 的车辆路径规划时延; 车辆与局部 MEC 平台间的信息处理时延, 则受限于 5 ms 的车辆远程控制时延. 根据这两个时延, 以及实际部署设备性能和所选通信协议, 可计算出单个全局管控云和单个局部 MEC 平台的最大覆盖范围^[24].

无线虚拟导轨系统工作流程如图 2 所示. 首先, 当全局管控云接收行车任务请求, 如需在位置 A 搭载两人到位置 B, 参考全局道路地图, 全局管控云调用位置 A 附近的空闲车辆, 如 1 号车辆, 根据各局部 MEC 平台覆盖范围和车辆流量, 为该任务车辆生成区域级行车路线, 指示车辆依次经过的局部 MEC 平台和平台内路边通信单元 (road side units, RSU), 并向路线沿途的局部 MEC 平台传递路线信息.

其中全局道路地图是全局管控云在虚拟三维空间对全局道路布局的投影, 还原道路尺寸、连接情况和畅通情况等道路状态, 也指示了各局部 MEC 平台及其 RSU 的控制范围. 全局道路地图仅用于行车路线规划, 其精度较低, 如 10 m 左右, 更新周期较长, 如 1 h 左右^[56,57]. 区域级行车路线是车辆起点到终点之间, 依次经过的局部 MEC 平台及其 RSU, 并指示了车辆行经各 RSU 内的时间, 区域级行车路线规划时延限制为 20 ms. 如从位置 A 到 B, 区域级行车路线为: 车辆从起点位置 A 出发, 前

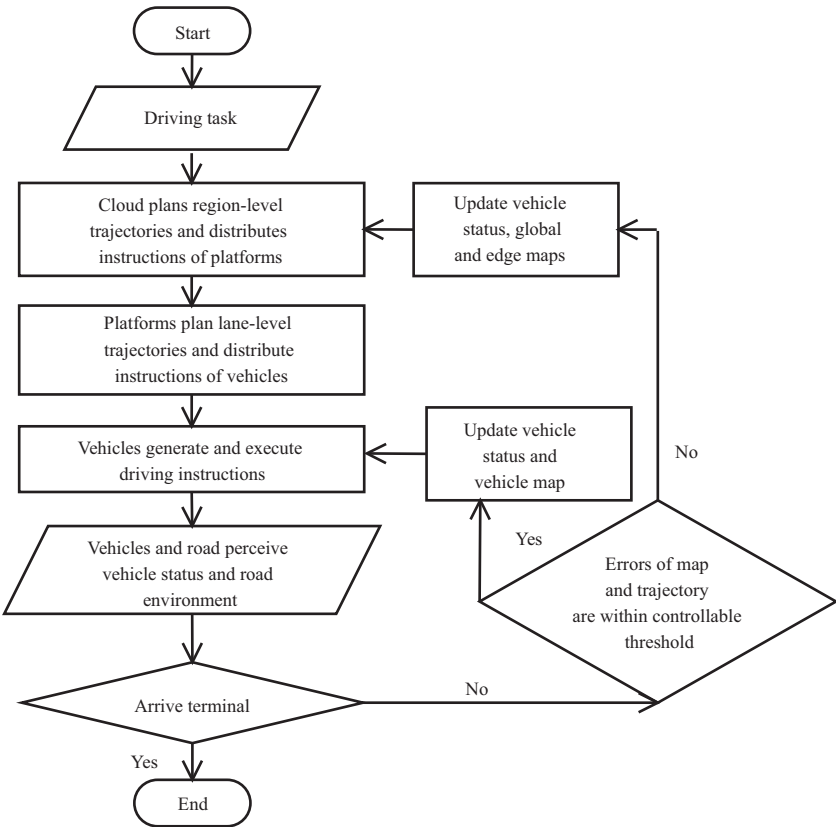


图 2 无线虚拟导轨系统工作流程图

Figure 2 The flowchart of wireless tracked and controlled automatic system

15 min 行经 1 号局部 MEC 平台的 1 号 RSU, 后 15 min 行经 2 号局部 MEC 平台的 2 号 RSU, 最后达到终点位置 B.

其次, 局部 MEC 平台根据该车辆的区域级行车路线, 参考局部信息化地图, 计算该车辆协同其他车辆行驶的车道级行车轨迹, 并向具体车辆传递轨迹信息.

其中局部信息化地图是对局部 MEC 平台管控范围内道路的三维空间数字化重构. 局部信息化地图不仅还原了各车道物理状态, 还包含了道路信息化设备 (如各类传感器) 状态和位置等信息, 以及道路物体 (如障碍物等) 位置信息. 局部信息化地图精度较高, 如 1 m 左右, 更新周期较短, 如 10 min 左右 [56, 57]. 车道级行车轨迹是局部 MEC 平台根据该平台的区域级行车路线和局部信息化地图, 为车辆规划的细粒度行车轨迹, 车道级行车轨迹规划需满足车辆远程控制时延要求 5 ms. 车道级行车轨迹由车辆前行路线上一系列离散位置点组成, 称之为导轨点, 还指示了车辆在每个导轨点的车身姿态、转向、速度、加速度等运动状态信息. 导轨点为道路中车辆位置标定点, 如卫星定位中经纬度点、RFID 定位中路面部署的 RFID 标签、磁场定位中路面部署的磁钉等. 导轨点间隔可根据路况和车辆定位技术而定, 在实现厘米级定位目标前提下, 尽可能减低道路中信息化设备成本. 比如, 使用 RFID 定位技术时, 可选用陶瓷类 RFID 标签, 其检测范围大, 则作为导轨点的 RFID 标签部署间隔较大, 可达到分米级. 但如果选用印制电路板 (printed circuit board, PCB) 类 RFID 标签, RFID 标签检测范围减小, 则需减小导轨点部署间隔.

最后, 无线引导车辆接收局部 MEC 平台下发的车道级行车轨迹, 结合车辆和信息化道路共同感

知到的车辆与车周物体状态,以及车周数字孪生地图,车载处理器计算行车指令,并实现车辆行驶状态控制.车载处理器首先根据感知到的信息,判断车辆实际位置附近最近的导轨点信息,然后与平台下发的车道级行车轨迹(目标)对比.车载处理器根据对比结果计算出实时行车指令,包括加速器(油门)、减速度(刹车)和转向器(方向盘)等控制参数,进行轨迹纠偏,最终控制车辆沿系统规划的车道级行车轨迹行驶.车内实时行车指令计算需满足车辆应急响应要求 3 ms.为实现系统多车联合控制,上述区域级行车路线、车道级行车轨迹和车辆行车控制均需考虑多车状态.比如,车辆 1 的区域级行车路线规划时,需考虑该车经过路口 C 时段的交通阻塞情况和通行车辆优先级,类似救护车和消防车的区域级行车路线规划能优先使用路口 C,而普通车辆需绕过路口 C.再如,若 3 号车辆与 1 号车辆具有相同的从 A 到 B 点的行车路线,且 3 号车在 1 号车正前方,则 1 号车和 3 号车的车道级行车轨迹和车辆行车控制需保证车辆间距.若两车以 7.5 m/s 的速度匀速前进,则两车间距需保持在 4.5 m 以上^[58].而信息化道路接收车辆感知数据和行车轨迹,并结合道路感知的车道状态,计算道路堵塞情况.随后道路用路标设备显示道路行人通行指示,如路口地面行人通行指示灯和车辆轨迹指示灯等,以尽可能避免行人行走轨迹与车辆虚拟导轨冲突,减少虚拟导轨调整,增加系统安全性.

其中,车辆状态与车周物体状态感知,由无线引导车辆和信息化道路共同完成.感知结果包括多类交通数据,如车辆位置和运动状态(如速度和加速度)、道路障碍物距离和行人相对位置等信息.车载传感器包括定位设备(如卫星定位终端、RFID 阅读器或磁传感器等)、惯导、里程计和雷达等,感知车辆位置、运动状态、车身周围物体类别及其运动状态.道路传感器包括车辆定位辅助设备(可作为导轨点),以及水位传感器、温度传感器、和行人红外检测等设备,完成车辆定位辅助和道路状态监测(包括道路积水、地面温度和行人状态等信息).感知结果利用无线通信技术汇聚至车载处理器处理,以更新存储于车载存储器的车周数字孪生地图,并进行车辆轨迹控制.在地图更新和轨迹控制过程中,车载处理器将感知数据与系统数据(车周数字孪生地图和车道级行车轨迹)进行对比,判断这两类数据误差是否超过安全阈值,如道路施工堵塞是否使车辆无法通行,或者指定时刻车辆位置误差是否超过 1 m^[59].当误差超过安全阈值,车辆应减速靠边停车,将感知到的地图和轨迹误差上报至局部 MEC 平台和全局管控云,请求调整车道级行车轨迹和区域级行车路线.车周数字孪生地图可利用车载雷达等传感器对车辆周围三维空间进行数字化重构,如使用超声波雷达可检测车周 2 m 半径范围行人和物体,并重构车周 2 m 范围内的三维空间^[60,61].该车周数字孪生地图包括道路状态、道路信息化设备位置和车周物体(车辆、障碍物和行人等)位置信息,还有车周行人和物体移动速度信息.与全局道路地图和局部信息化地图相比,车周数字孪生地图精度最高,如车周数字孪生地图对物体位置和形状的描述准确度可达厘米级,更新周期最短,如秒级^[56,57].

2.2 关键技术分析

由以上无线虚拟导轨系统工作流程可知,为完成车辆与车周物体状态感知,协同多车辆有序完成行车任务,全局管控云、局部 MEC 平台、无线引导车辆和信息化道路需要配置不同的模块,分别完成各自任务.各级模块的功能可总结为感知、通信、计算和控制 4 个方面,如图 3 所示.

全局管控云负责汇总最新全局车道信息,更新其全局道路地图,计算分析行车任务后为各车辆规划区域级行车路线.全局管控云主要由组成云计算单元和存储单元,以及网络交换机组成.为协同全局车辆,即全局管控云需集中控制全局车辆行车路线,但云和车辆间数据传输时延无法达到自动驾驶车辆远程控制的毫秒级,云对车辆直接控制则难以应对突发事故和实时车辆轨迹控制.因此,无线虚拟导轨系统需对车辆控制任务和设备管理任务进行分级,从全局到局部,控制范围变小,控制精度增加,控制时延减小.比如,全局管控云负责粗粒度的区域级行车路线规划,局部 MEC 平台负责细粒度的车

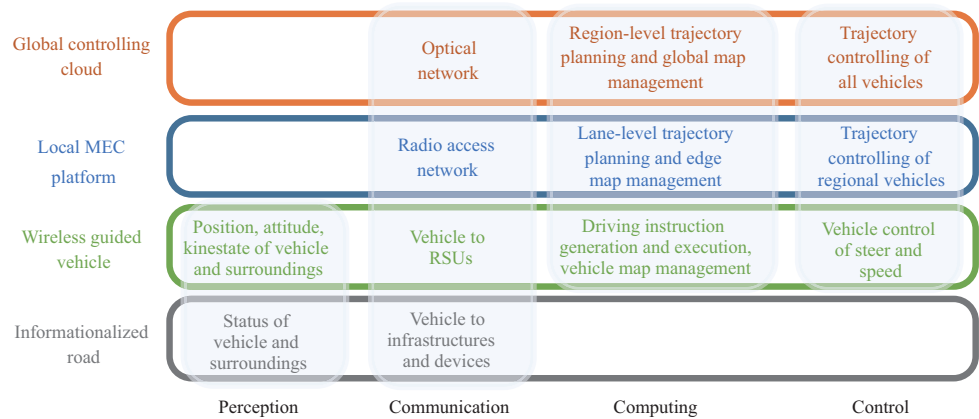


图 3 (网络版彩图) 系统各级模块功能指示
Figure 3 (Color online) The functions of each system module

道级行车轨迹规划, 车辆负责最终的车辆行驶轨迹控制. 为实现云、平台和车各级设备的分级管控, 并以统一的方案协同调度和准确控制全局车辆, 亟需研究分配各级管控任务的集中式分级管控技术.

局部 MEC 平台将计算单元部署在网络边缘, 利用无线通信技术实现与车辆间低时延数据传输. 局部 MEC 平台由多个 RSU、光纤网络、通信基带处理单元、边缘计算和存储单元、网络交换机构成, 其中 RSU 为移动网络无线接入点, 仅具有远程射频单元. 局部 MEC 平台实体中, 单个移动边缘计算节点通过光纤网络连接多个 RSU, 形成一个局部 MEC 平台实体. 其中, 移动边缘计算节点由放置在同一位置的通信基带处理单元、边缘计算和存储单元、网络交换机组成. 局部 MEC 平台中, 移动边缘计算节点具有通信基带处理单元, 这增强了局部 MEC 平台对车辆移动通信的兼容性, 且通信基带处理单元与车辆数据交互需满足 1 ms 的移动网络空口时延要求, 这有利于 5 ms 车辆远程控制时延的实现. 相比之下, 普通边缘计算平台不具有通信基带处理单元, 难以保障边缘计算平台和车辆间信息交互时延, 无法保障 5 ms 的车辆远程控制时延, 则不能作为无线虚拟导轨系统的边缘级管控模块. 在单个局部 MEC 平台内, 其移动边缘计算节点连接的所有 RSU 的通信信号可达范围共同组成了该平台的控制范围. 平台与车辆间的无线通信性能对车辆协同控制至关重要, 无线通信传输数据的可靠性和时效性决定车辆行驶的安全性, 无线通信需达到 99.999% 以上的正确率和 1 ms 以下的时延^[24]. 但实际交通环境中无线通信电磁环境复杂, 车辆始终处于移动状态, 如何实现高可靠低时延无线通信技术是无线虚拟导轨系统面临的一大挑战.

无线引导车辆需安装感知设备、通信设备、车载处理器和车辆机械器件等. 车载通信设备包括车辆与 RSU 和道路的通信器件. 信息化道路需部署感知设备、通信设备、道路处理器和路标设备. 道路通信设备将道路状态数据传输至该路段车辆, 并接收车辆状态和轨迹信息. 在车辆与车周物体状态感知中, 位置信息决定车辆状态的控制策略和多车协同路线, 是整个无线虚拟导轨安全高效运行的重要参考信息. 无线虚拟导轨系统内多车联合调度要求车辆定位精度达到厘米级, 定位时延需达到毫秒级^[62, 63]. 然而, 车辆的高移动特性和道路环境等因素, 如封闭隧道、雨雪天气和路面垃圾等, 对全时空的厘米级定位带来了巨大挑战. 传统的道路和车载定位设备, 基于单一技术 (如磁场、射频信号或光线/激光成像) 定位, 在上述不同场景下, 难以同时保障车辆位置信息的准确测量, 定位误差大. 因此, 无线虚拟导轨系统亟需高精度车辆定位技术.

综上, 为保障无线虚拟导轨系统有序、安全和高效运行, 从全局到局部功能的实现需要以下 3 项

关键技术: 集中式分级管控技术、高可靠低时延无线通信技术和高精度车辆定位技术. 在 3 项关键技术基础上, 云、平台和车分级实现车辆行驶任务规划和调整的计算任务, 无线通信实现平台与车路间信息交互, 车和路实现车路物理状态联合感知. 通信技术联合了多模块的感知和计算能力, 有益于多车联合调度的协同路径规划和实时车辆控制, 实现感知、通信和计算技术深度融合.

2.3 集中式分级管控技术

集中式分级管控技术将系统管控分为全局级、边缘级和车道级, 如图 4 所示, 分别处理全局粗粒度管控和全局道路地图、边缘细粒度管控和局部信息化地图、单车行驶管控和车周数字孪生地图. 各级间基于通信网络交互信息, 以全局管控云为中心, 协同边缘级设备和车道级设备, 形成车辆感知和控制闭环. 集中管控有利于统一调配和协调全局资源, 协调多设备和多车辆, 按时准确完成指定行车任务. 但系统中各级设备物理位置分散, 如果全局车辆的行驶控制参数均由全局管控云计算, 则算法复杂度高, 实现难度大. 同时, 信息传输时延增加, 车辆的感知和控制时延无法达到毫秒级, 难以达到虚拟导轨要求的厘米级控制误差和突发事故应急响应的需求. 因此, 在无线虚拟导轨中, 各级模块负责时延要求不同的系统资源和车辆控制任务, 保障系统的可靠性. 全局管控云只负责整体宏观管控, 如粗粒度的区域级行车路线规划 (满足 20 ms 的路径规划时延要求), 局部 MEC 平台则细化管控细节, 如细粒度的车道级行车轨迹设置 (满足 5 ms 的车辆远程控制时延要求), 车辆和道路执行管控中行车控制和感知任务, 如定位和速度控制 (满足 3 ms 的车辆应急响应时延要求). 通过上述集中式分级管控, 即能保障全局管控云对车辆、通信、计算、存储等资源的集中统一管控, 又能实现系统各级模块间的分级协作和车辆准确控制, 充分降低各级模块的任务处理量和信息传递量.

具体而言, 全局级管控由全局管控云负责, 需参考全局道路地图. 全局管控云先汇聚整个系统的实时交通信息和网络资源变化信息, 结合平台上报的导轨和地图误差数据, 更新全局道路地图. 全局级管控根据系统行程请求任务, 选定车辆执行任务, 并规划出来该车区域级行车路线, 生成全局资源管控指令, 后将信息下发至边缘级管控层; 边缘管控由局部 MEC 平台负责, 需参考局部信息化地图. 局部 MEC 平台定期汇聚边缘交通和平台资源变化, 结合车辆上报的轨迹和地图误差, 以及云下发的管控信息, 更新局部信息化地图, 规划和调整车辆车道级行车轨迹, 生成平台资源管控指令. 车道级管控由车辆和道路负责, 需参考车周数字孪生地图. 车辆和道路中部署的传感器协作感知车辆和道路状态信息, 参考车周数字孪生地图和车道级行车轨迹等管控信息结合, 生成并执行车辆控制 (加速、减速和转向) 和资源管控等指令. 车载处理器计算导轨和地图误差, 如误差在安全阈值内, 则调整车辆控制参数, 否则减速靠边停车, 并上报导轨和地图误差.

2.4 高可靠低时延无线通信技术

根据 5G 标准中高可靠低延迟通信 (ultra-reliable and low latency communications, URLLC) 场景中给出的车辆远程控制指标, 其业务时延不超过 5 ms, 空口时延不超过 1 ms, 可靠性高于 99.999% [64]. 无线虚拟导轨中行车控制关系到系统安全, 全局管控云和局部 MEC 平台均需借助无线通信技术, 最终实现车辆行驶状态的远程控制. 但车辆具有高移动性和道路具有环境多样性, 这使无线通信信道急剧变化, 无线通信数据传输可靠性降低, 信道估计开销增加, 供传输业务数据的无线资源比重下降, 传输时延增加. 无线通信性能下降严重威胁车辆行驶的安全性. 为实现高可靠低时延的无线通信, 需减小无线通信资源调度粒度, 以降低时延, 同时增大传输冗余, 以增加可靠性. 物理层有限码长编码和多天线多输入多输出 (massive multiple-input multiple-output, MIMO) 传输是当前广泛研究的两项高可靠低时延无线通信技术 [65,66].

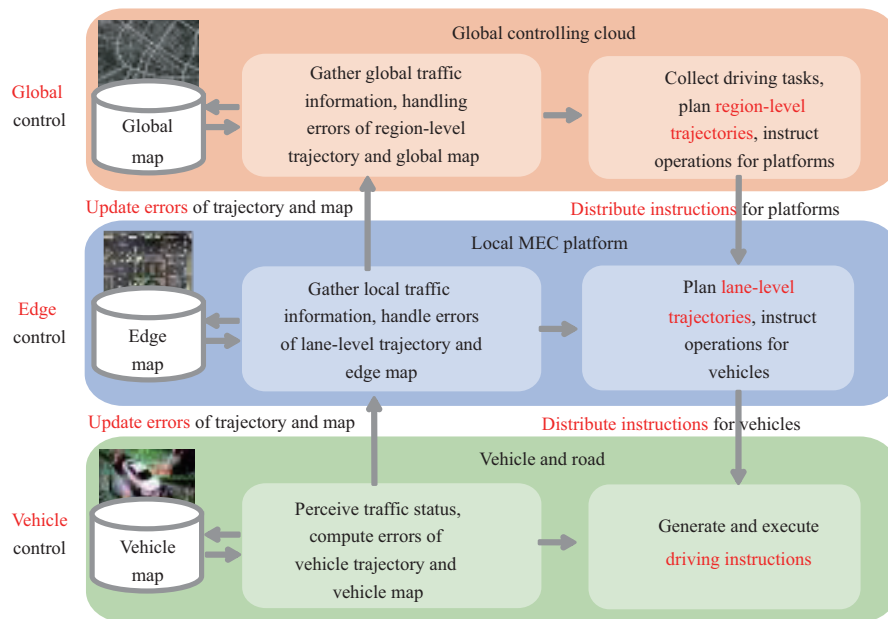


图 4 (网络版彩图) 集中式分级管控信息传送

Figure 4 (Color online) The information transmission of centralized-hierarchical controlling

有限码长编码技术能降低编译码复杂度和时延. 2010 年, 普林斯顿大学 (Princeton University) 的 Polyanskiy 等^[67] 针对有限码长输入的系统, 提出了有限码编码下通信系统的性能界, 这一突破标志着以经典香农 (Shannon) 信息论为基础的通信系统有了新的理论依据. Sybis 等^[68] 针对 5G URLLC 通信场景, 研究了不同码在较短码长下的性能. 文中指出, 在码长 40 比特, 1/3 码率, 正交相移键控 (quadrature phase shift keying, QPSK) 调制下, 误块率要求为 99.9999% 情况, Polar 码和 LDPC 码的信噪比要求比 Turbo 码低 0.5~1.5 dB. 多天线 MIMO 传输技术利用空间维度资源实现信道的分集和复用^[69~72], 达到增强系统覆盖、提高系统容量、提高用户峰值速率、改善链路质量的效果. 收发端配置大量天线构建大规模 MIMO 天线阵, 以大幅的增加系统分集增益、复用增益和能耗效率^[73], 提高系统容量、降低传输时延和提高可靠性^[74].

2.5 高精度车辆定位技术

高精度车辆定位技术基于车辆和道路感知设备检测到的信息, 快速精确计算车辆的物理空间位置, 为无线虚拟导轨系统的虚拟导轨规划和车载轨迹偏移纠正提供关键信息. 在无线虚拟导轨系统中, 车辆在导轨点处的实际物理状态参数 (如到达时刻、车辆转向角、速度和加速度等), 需与局部 MEC 平台规划的车道级行车轨迹一致, 而物理状态参数的测量和计算均与车辆实际位置信息紧密相关. 因为, 车辆位置与时间信息的对应关系形成轨迹, 轨迹的一阶导数为速度, 轨迹的二阶导数为加速度. 此外, 参考车辆运动学理论, 可根据车辆实际行驶轨迹计算车辆转向角^[75]. 而基于车辆位置所得车辆速度、加速度和转向角等物理状态信息, 可与惯导和里程计测量的路程、速度、加速度和转向角数据融合, 降低惯导和里程计仪器测量误差和噪声, 提升车辆物理状态信息测量结果的准确性. 可见, 车辆定位在无线虚拟导轨系统中起着至关重要的作用. 无线虚拟导轨以实现美国汽车工程师学会 (Society of Automotive Engineers, SAE) L4 自动驾驶为目标, 其定位性能要求需满足厘米级定位精度和毫秒级定位时延^[62, 63, 76, 77].

基于高精度车辆定位技术, 车辆获取自身位置信息, 并计算车辆速度等物理状态信息, 利用高可靠低时延无线通信技术将车辆物理状态信息传至局部 MEC 平台, 再传至全局管控云. 云和平台先后根据车辆物理状态和各自的地图, 规划与调整区域级行车路线和车道级行车轨迹. 基于车辆定位结果, 集中式分级管控技术实现系统各级模块间的轨迹和地图误差等信息处理, 有效管控各级资源和车辆行车控制参数. 该流程使车辆在各导轨点位置的实际物理状态与规划的虚拟导轨一致, 实现车辆导轨式行驶. 因此, 车辆位置作为整个系统运行的关键参数, 贯穿感知、通信、计算和控制各个环节, 车辆定位所达到的性能直接影响系统运行效果.

目前主流的定位技术包括: 卫星定位系统、视觉和雷达成像定位、惯性导航定位、蜂窝网络定位技术、RFID 技术、磁定位技术、超宽带 (ultra wide band, UWB) 定位、Wi-Fi 定位技术和蓝牙定位技术等. 其中 UWB、Wi-Fi 和蓝牙这 3 种基于电磁波实现的定位技术, 其基本原理与短距离 RFID 定位和远距离基站定位的基本原理相同, 均通过测量电磁信号幅度、相位和传播时间等参数, 确定收发设备间位置关系^[78]. 在光线昏暗、高楼密集和电磁信号复杂等多样的道路场景下, 仅基于单类定位技术实现的定位性能难以达到无线虚拟导轨系统定位性能要求, 需融合多类定位技术来计算最终定位结果. 融合定位可提高定位精度、频率和鲁棒性, 并降低定位时延, 以达到无线虚拟导轨系统给定定位指标. 基于感通算融合的无线虚拟导轨系统, 可提供多种车辆物理状态信息, 供车辆定位使用. 例如, 目前自动驾驶车辆均可配置惯导和里程计, 可感知车辆速度等物理状态信息. 车辆可进行惯性导航定位, 虽然该定位结果会出现累计误差, 但可作为无线虚拟导轨中融合定位技术中的一部分, 辅助优化定位结果. 此外, 在局部 MEC 平台中, 为车辆的服务的 RSU 基站的小区编号和位置也可作为定位参考数据. 因此, 无线虚拟导轨系统可将惯导、里程计、基站小区位置及编号信息, 融合至任意单一的定位技术 (RFID、卫星、成像、磁场、基站) 中, 优化定位方案, 有望实现厘米级精度和毫秒级时延的融合定位方案.

3 基于融合定位的无线虚拟导轨

根据无线虚拟导轨系统性能需求和道路环境特点, 本文综述了 5 种融合定位方案, 分别以不同单一定位技术主导, 依次是 RFID 追踪、卫星导航、图标循迹、单点磁编码、基站感知. 惯导、里程计和基站位置及编号信息作为不同融合定位方案中的辅助信息, 参与各定位技术的信息融合, 可提升定位精度和减小定位时延, 分别实现 5 种融合定位. 而以各单一定位技术主导的 5 种融合定位, 它们各自适用于不同道路场景, 如卫星导航适用于郊区道路场景, RFID 追踪适用于隧道道路场景, 因此可在不同道路场景使用不同融合定位方案, 提升整个系统的定位可靠性.

3.1 基于 RFID 追踪的无线虚拟导轨

RFID 具有设备体积小、部署方便、价格低廉、可重复利用、读取速度快等特点, 常用于门禁系统、电子证件, 也可基于超高频和微波频段进行目标定位, 具有广泛的应用前景. RFID 系统一般由电子标签、阅读器、中间件软件及后台数据处理网络 4 部分构成. RFID 系统可工作在低频 (low frequency, LF, 频率范围为 30~300 kHz)、高频 (high frequency, HF, 频率范围为 3~30 MHz)、特高频 (ultra high frequency, UHF, 频率范围为 300 MHz~3 GHz) 和超高频 (super high frequency, SHF, 频率范围为 3~30 GHz). LF 和 HF 系统主要面向目标身份识别, 采用电感耦合方式, 通信距离短, 常见应用包括门禁系统、电子证件等. UHF 和 SHF 系统采用电磁耦合方式, 通信距离较长, 除了身份识别外, 还可以用于目标定位, 适用于仓储物流管理等.

在 RFID 的定位技术中, 通常将阅读器安装在车辆底盘, 标签铺设在道路. 根据定位算法对标签与阅读器间距离的测量与否, 可分为非测距定位和三边测距定位. 非测距定位无需计算阅读器与各标签之间的距离, 该方法基于阅读器与全部标签之间的连通情况, 估计读写器与参考标签之间的位置关系, 无需测量阅读器与各标签之间的距离, 包括指纹定位和质心定位两种. 前者结合读写器的接收信号特征值, 如接收信号强度 (received signal strength, RSS), 直接查找特征值在数据库中对应的位置信息. 该方法受环境影响, 波动较大, 当环境发生改变后, 需重新测定 RFID 信号的空间特征, 适用性较差, 定位精度仅可达 0.2 m^[79~81]; 后者参考阅读器检测到的多个标签的位置信息, 将这些位置所构成的图形的质心设置为阅读器位置^[82~85]. 该方法需要在地面铺设大量 RFID 标签, 工程量大, 标签冲突严重, 且定位误差随着速度急剧增大, 单平米标签数达 100, 才可达 1~2 cm 的定位精度, 部署成本高^[84,85]. 三边测距定位中, 阅读器根据检测到的标签反射或发射信号的 RSS 或到达相位 (phase of arrival, POA) 等参数, 可计算出阅读器和 3 个标签的间距, 参考标签位置信息, 联立位置距离方程确定阅读器位置^[86~88]. 标签和阅读器部署方面, 选择成本低的单阅读器测距, 标签部署间隔大于标签可检测距离的两倍, 则同一时刻阅读器仅能检测到单个标签, 避免标签冲突. 三边定位中, 基于 RSS 测距定位利用信道模型将收发信号路损转换为距离, 但该方案受环境差异影响大, 不同环境的信号衰减系数差异大, 测距误差在分米级; 基于信号 POA 测距可削减环境影响, 并计算多个接收信号的到达相位差 (phase difference of arrival, PDOA) 实现相位与距离的转换^[89~93]. PDOA 可基于同一位置不同频率接收信号计算^[89], 也可基于同一频率不同位置接收信号计算^[91], 前者带宽需求大、射频器件成本高, 后者可结合车载惯导和里程计算出车辆位移和阅读器与标签间相对位置, 可达到厘米级定位精度.

综上, 本文提出融合惯导和里程计, 利用多位置点接收的同频 RFID 标签反射信号, 实现 RFID-PDOA 定位. 该方案车道传感器部署如图 5 所示, RFID 标签作为路面引导物, 在车道中心线等间隔部署. 为使标签可检测区域不重叠, 标签间距一般大于标签最大可检测测距离的两倍, 以保证阅读器每次只能读取到一个 RFID 标签, 避免标签冲突. 系统道路信息化数字孪生地图中存储标签信息, 包含每个标签的绝对位置和标签 ID 等. 车辆底盘安装单个阅读器, 位于车辆前端中心位置. 当车辆沿车道行驶时, 阅读器读取路面 RFID 标签的反射信号, 记录不同时刻和位置下接收信号相位差和标签识别号 (identifier, ID). 根据多个位置接收的同频段 RFID 信号, 可实现 PDOA 三边测距定位. 再参考惯导和里程计提供相对位移、速度、加速度和方位角等信息, 列出车辆位移方程式, 确定车辆位置. 当车载阅读器检测不到标签时, 车辆可通过惯导和里程计构造运动学位移方程, 进行短时间的惯性导航定位. 为保障系统厘米级定位精度, 惯性导航定位范围有所限制. 车辆需参考惯导和里程计测量数据准确度和惯性导航定位算法, 先得出定位累计误差与车辆位移间的函数关系, 再确定采用惯性导航定位时允许车辆行驶的位移范围, 避免定位累计误差超过厘米级^[94,95].

在基于 RFID 定位的无线虚拟导轨系统中, 因标签处定位误差相对最小, 可将每个标签所处位置设为导轨点, 为无线虚拟导轨系统提供准确的车辆位置信息. 参考无线虚拟导轨系统要求的厘米级定位精度, 考虑 RFID 定位设备和算法定位性能, 以及器件部署成本和车道级行车轨迹规划复杂度要求, 可研究确定导轨点间隔. 比如, 在 RFID-PDOA 定位方案中, 因安装在车辆底盘的 RFID 阅读器的天线波束宽度有限, 则天线波束宽度决定了标签可检测范围. 当天线波束宽度为 120°, 天线水平放置, 车辆底盘高度为 0.3 m. 则以标签为圆心, 半径为 0.52 m 的圆形范围, 是标签的可检测范围. 在标签可检测范围内, RFID 阅读器均能准确测量标签反射信号 PDOA, 实现厘米级定位. 而在标签可检测范围之外, 车辆仅能用惯性导航定位, 会产生累计误差. 为减小累计误差, 道路中所有标签的可检测范围总和应尽可能大. 但是, 为降低 RFID 标签部署成本, 尽可能减少标签使用量, 需增加标签间隔. 且标签 (导轨点) 间距减小, 车道级行车轨迹中导轨点总数则增加, 轨迹规划计算量增加. 此情况下, 可设置标签

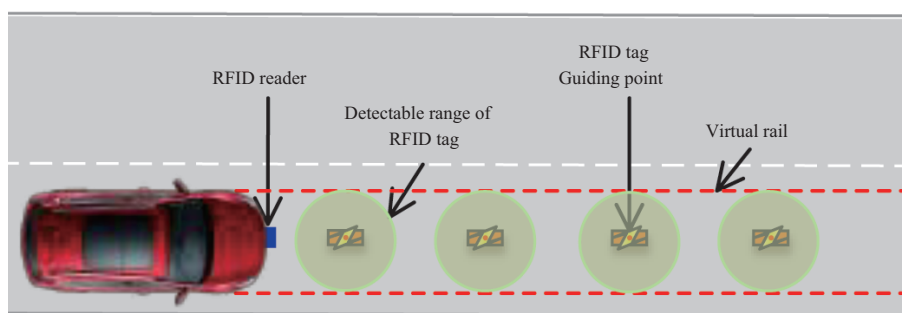


图 5 (网络版彩图) 基于 RFID 定位的虚拟导轨

Figure 5 (Color online) The virtual rail based on RFID localization

间隔 (导轨点间距) 为临界值 1.04 m, 即检测半径的两倍, 使车道中心线全部处于标签可检测范围内. 车辆虚拟导轨所在路径为起点与终点间 RFID 标签序列的连接线.

此定位方案定位算法复杂度低, RFID 器件成本低, 可达厘米级定位精度, 有利于系统车辆所在环境快速感知和提高控制精度. 另一方面, 在建筑密集的城市道路中卫星信号易受遮挡, 隧道环境中光线不佳影响视觉定位效果, 而 RFID 的定位效果在上述环境中能不受影响. 但是, 系统 RFID 标签部署涉及路面改造, 实施难度大, 且路面遮挡物会对定位误差有一定影响.

3.2 基于卫星导航的无线虚拟导轨

卫星定位中, 终端测量卫星的信号传输时延或到达相位, 解算出接收机到卫星的距离, 再利用测量学中的交会测量原理确定卫星信号接收机的位置. 理论上, 卫星定位就是求解待测设备的三维地心球坐标, 至少需要 3 个方程, 因而在定位过程中需要 3 个卫星坐标以及对应卫星到定位设备的测量距离. 但是在实际应用中, 地面终端与卫星间存在较大的时钟误差, 会导致测量距离不准确. 为提高卫星定位精度, 需要考虑接收机时钟误差, 因此系统多引入了一个变量. 则终端需要捕获四颗卫星, 以进行终端位置信息的计算.

此外星历误差、对流层延迟和电离层延迟等因素同样会造成测量距离不准确, 但这些因素造成的误差存在一定的规律性, 可建模估计误差与空间位置的关系, 求解误差, 削弱或者消除这些因素对卫星定位精度的影响. 例如基于基站的全球卫星导航系统辅助 (assisted global navigation satellite system, A-GNSS), 又称为实时动态 (real-time kinematic, RTK). 其主要思想是利用已知位置的基站接收卫星信号, 以估计卫星定位结果在方向和距离上的偏差, 基站还可将卫星星历信息、同步时间、多普勒 (Doppler) 频移、粗略定位信息、导频信号等辅助信息发送给定位终端, 终端联合偏差模型、接收的卫星信号和辅助信息, 确定自身位置^[26,96,97]. 在空旷地带, 单一的卫星定位精度可达 20 m, 再引入 A-GNSS 技术可以降低信号空间传输时延引起等因素引起的误差, 实现厘米级定位精度. 但在城市路段中, 卫星信号受到遮挡, 无法提供高精度定位服务, 定位精度仅在 8 m 左右^[26]. 因此, 在城市环境中使用卫星定位需要加入其他辅助定位技术^[98].

车辆均配置了惯导和里程计, 在无线虚拟导轨中, 考虑采用以卫星导航为主, 惯导和里程计信息辅助的融合定位技术. 不仅可利用惯导测量速度滤除卫星信号中数据抖动, 优化原始测量数据的滤波处理, 还可利用惯导和里程计的惯性导航定位, 在卫星信号盲区进行补充定位. 该方案部署如图 6 所示, 无需改造路面, 仅在车辆上安装卫星信号接收器以实现定位. 车载终端捕获导航卫星信号, 基于惯导和里程计测得速度滤除卫星信号中数据抖动, 利用射频信号测距码相关性算出车辆与各卫星间的距

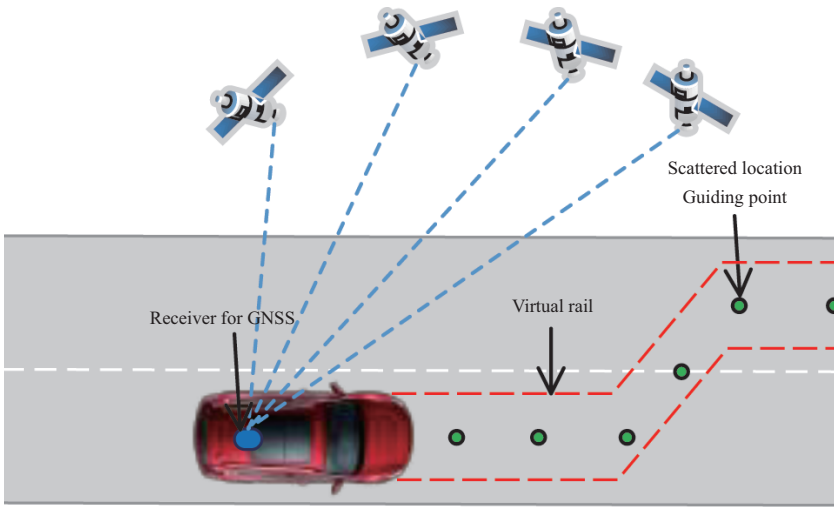


图 6 (网络版彩图) 基于卫星定位的虚拟导轨

Figure 6 (Color online) The virtual rail based on A-GNSS localization

离, 并参考卫星的位置信息和基站的传输距离偏差, 求得车辆绝对位置^[99~102]. 对卫星信号无法覆盖的区域, 比如密集楼宇之间, 联合惯导和里程计测得的车辆行驶路程、速度和加速度信息, 以及车辆服务基站等信息, 进行惯性导航定位^[103, 104]. 与 RFID 定位方案中相同, 为保证系统厘米级定位精度, 参考定位累计误差随位移变化规律, 确定惯性导航定位范围, 且卫星信号无法覆盖区域应处于惯性导航定位范围内.

在卫星导航主导的融合方案中, 虚拟导轨所在路径为由经纬度和海拔表示的离散空间坐标点序列连接线, 每一个离散点即为系统导轨点. 在此定位方案中, 路面不需部署硬件器件, 减小导轨点间距不会增加系统部署成本, 且能增加车辆控制精度. 在车道级行车轨迹, 导轨点指示车辆行驶状态信息, 导轨点间隔越小, 则系统给出轨迹信息越精细, 行车控制越准确. 但是, 导轨点间距减少, 车道级行车轨迹中导轨点总数则增加. 每新增一个导轨点, 局部 MEC 平台则需为该点设计车辆运动状态, 系统轨迹规划计算量增加. 因此, 导轨点间隔设置是一个待研究问题, 可根据实际路况下车辆行驶轨迹控制效果, 并权衡系统计算能力, 合理设置导轨点间隔.

卫星导航系统可实现全球覆盖, 不需要额外铺设路面定位单元, 可用空间坐标标识任意物理点, 虚拟导轨和导轨点不受限于固定位置能灵活按需设置. 但是, 卫星定位对环境要求高, 在恶劣天气时候和建筑物密集地区定位误差大.

3.3 基于图标循迹的无线虚拟导轨

基于雷达或相机成像实现定位的技术在自动驾驶定位和导航领域得到了广泛的应用, 其主要原理是利用可见光、激光、毫米波或超声波对环境物体的反射情况, 建立电磁波传播模型, 计算传感器与反射物相对位置, 增大范围扫描可建立环境图像. 再参考系统存储地图和周围物体位置, 确定搭载传感器的车辆所在位置.

雷达定位中, 车载雷达向特定方向发射电磁波, 根据电磁波频段差别, 可分为超声波雷达、毫米波雷达和激光雷达, 最大探测距离依次为 2, 100 和 200 m^[105]. 其中超声波传播速度慢, 传播距离短, 常用于近距离低速物体的距离探测, 如倒车场景障碍物测距. 毫米波雷达不易受天气及光线条件影响, 但探测视角较小, 水平方向为 120°, 垂直方向为 30°^[106~108], 用于自动驾驶单车道前后车相对定位, 不

适用于十字路口等复杂交通场景. 激光雷达的视角大, 水平方向为 360° , 垂直方向为 40° [107,109], 其测量准确率、测距精度和角清晰度更高, 三维图像获取能力更强, 常用于基于环境成像的车辆定位中, 如同步定位与地图构建技术 (simultaneous localization and mapping, SLAM), 但易受降雨等天气影响. 相机定位则是利用光学成像展现车辆周围物体形态, 与激光雷达相比, 相机价格低廉, 应用更广. 根据相机成像维度, 可分为三维呈像的深度相机 [110] 和二维呈像的普通相机 [111]. 深度相机增加呈像物体的深度信息, 可同时获取物体彩色和红外深度图像, 恢复环境三维环境图像实现车辆定位, 定位精度可达厘米级 [112]. 在昏暗的情况下, 深度相机依然可测量得到深度信息, 但其计算复杂度高, 且容易受到太阳光中红外线的影响, 不适用于处于阳光下的户外道路定位场景. 普通相机定位不受天气和太阳光影响小, 但若仅用单目相机, 获取信息有限, 难以测量目标物体与相机间距, 定位精确难以达到厘米级 [113]. 可考虑双目相机定位, 根据物体成像差异、相机几何关系和三角形相似原理, 计算目标物体与相机距离, 可将定位精度提升至厘米级 [114]. 在相机成像定位中, 根据参考物数的不同, 可分为多参考物的 SLAM 和指定参考物的位置图像标识定位 (如二维码和车道线) [115]. 基于相机的 SLAM 定位精度虽可达厘米级, 但需要数据量庞大的高精度地图支撑, 由于道路环境动态性强, 则高精度地图需要更新周期需达到秒级, 频繁的高精度地图更新需要的计算开销大, 每秒需达 200 万亿次浮点运算 [116]. 此外, 当不同位置的周围环境相似, 相机 SLAM 定位技术难以区分这些不同的位置, 则此时定位误差无法达到厘米级. 而道路中, 不同位置常常具有相似的环境, 特别是高速路路段, 则本系统中不考虑采用相机的 SLAM 定位. 在位置图像标识定位中, 二维码图像储存信息与该位置坐标一一对应, 并根据二维码图像大小和旋转情况以计算车辆位置与方位 [117~119]. 该方案算法复杂度和所需地图信息相对 SLAM 低, 累计误差可消除, 可达厘米级定位精度 [112,120]. 如果车辆配置了高性能图像处理芯片, 如特斯拉 FSD HW3.0 [121,122], 则可提升图像识别速度, 将处理时延从秒级降至毫秒级 [123~125]. 此外, 也有研究提出增加车道线位置图标, 共用双目相机设备, 融合二维码和车道线两种位置图像标识的位置关系特征, 可提升二维码识别概率和速度, 还能减小车辆横向偏移, 提升定位精度 [119,126~128].

在无线虚拟导航中, 可考虑以双目相机识别地面图标定位为主, 融合惯导和里程计数据实现融合定位. 其中地面图标融合二维码和车道线两种图像特征, 有利于减小定位误差和时延. 该方案车道线传感器部署如图 7 所示, 在系统道路中心绘制连续的车道线和离散的二维码, 两者均作为车辆定位路面引导物. 系统中每个路面二维码分别与特定绝对位置相对应, 将两者信息绑定并存入系统信息化地图. 车辆安装双目相机和高性能图像处理器, 利用基于深度学习的图像识别算法, 识别路面二维码和车道线, 并计算车辆与两种位置图像标识间的相对位置关系, 实现车辆定位. 车载惯导与里程计提供的距离、速度、加速度和方位角信息, 可以辅助查找二维码和车道线在图像中的特征, 减少算法复杂度. 另一方面, 在无法检测到路面图像标识的场景中, 车载惯导与里程计还能进行惯性导航定位. 与前两种定位方案相同, 惯性导航定位范围受器件和算法性能限制.

在基于图标寻迹的无线虚拟导航系统中, 每个二维码具有独特的位置信息, 该点的定位误差相对其他位置更小, 则将二维码位置中心设置为导航点. 车辆在导航点处对比车辆实际运动状态与虚拟导航指示状态误差, 进行轨迹纠偏. 与 RFID 定位方案相同, 系统导航点间距与设备性能、算法性能、部署成本和轨迹规划等因素相关, 需根据实际参数研究确定.

基于视觉图标的定位方案受环境电磁干扰小, 能适应复杂的电磁辐射环境. 并且, 基于视觉图像, 还能获取周围环境道路信息, 这有助于行人和障碍物检测, 提高系统安全性. 但是, 与 RFID、卫星导航、磁定位和基站定位相比, 基于视觉图像实现的定位方案对光线要求高, 在夜晚情况下难以实现高精度定位, 并且数据量大, 计算复杂度较高.

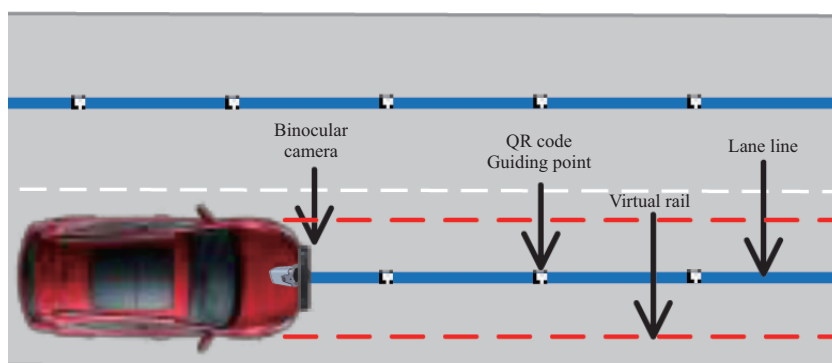


图 7 (网络版彩图) 基于摄像头定位的虚拟导轨

Figure 7 (Color online) The virtual rail based on camera localization

3.4 基于单点磁编码的无线虚拟导轨

磁传感器能感应磁铁产生的磁场, 参考磁铁磁场的强度几何变化特征, 磁传感器可确定其与磁铁的相对位置关系. 若已知磁铁绝对位置, 则可确定磁传感器绝对位置. 比如, 将磁铁部署于道路中特定位置, 该位置坐标已知, 而磁传感器安装与车辆底盘. 参考磁传感器检测到的磁场信息, 车载处理器可计算车辆位置. 基于磁铁磁场信息实现定位的方法, 成本低廉, 广泛应用于车辆、机器人和医疗等领域的定位功能中. 就磁铁来说, 与电磁铁相比, 永磁铁产生的磁场强度更强, 磁场持续时间更长, 可靠性更高, 且不需要实时消耗能量^[129]. 因此, 在道路车辆磁定位应用场景中, 永磁铁常选用为定位磁铁. 永磁铁主要分为两类大类: 磁钉 (magnetic marker, MM) 和磁条 (magnetic strip, MS)^[130]. 与磁钉相比, 磁条可沿道路连续铺设, 能更有效地检测车辆行驶的横向偏移, 而磁钉铺设难度较小, 费用更低, 维护难度更小^[131]. 磁钉和磁条各具优缺点, 根据车辆实际用途、尺寸和道路传感器部署方案, 可选用磁钉或磁条. 就磁传感器而言, 根据测量原理的不同, 常用类型有为线圈型、霍尔 (Hall) 组件和磁阻组件, 其中线圈型仅能测量磁场的动态变化, 霍尔组件和磁阻组件利用洛伦兹 (Lorentz) 力原理在静态和动态场景下均能准确测量磁场的强度和方向^[132], 但磁阻组件磁场精度测量精度更高, 更适用于定位^[133].

磁定位主要有 3 类定位方法: 多传感器磁场差^[134, 135]、磁感应强度分布方程^[136, 137]、磁指纹定位^[138~143]. 多传感器磁场差定位是对比多个磁传感器磁场极性, 确定终端与磁性材料的相对位置^[134, 135], 该方法定位精度高度依赖磁铁和磁传感器的部署方式, 且仅利用磁场的存在性信息实现定位, 定位精度为分米级. 磁感应强度分布方程定位参考磁场分布规律和终端磁传感器测得磁感应强度值, 基于磁场分布方程求解位置关系. 该方法虽可达厘米级定位, 但对测磁感应强度值敏感, 外部电磁干扰会使定位精度急剧下降^[136]. 此外, 这两类方法不区分不同位置磁铁的特征, 绝对位置信息无法从磁铁特征中获得, 即无法实现绝对定位, 定位误差会随系统运行不断累计. 磁指纹定位从多磁铁磁场分布特性出发, 在定位系统中绑定并存储特定位置坐标和该位置独有的磁感应强度特征, 形成磁定位指纹库. 实时定位时, 系统根据磁传感器实时测得的磁感应强度, 查找绝对位置坐标, 计算相对位置. 磁指纹定位中, 磁铁磁场特征形成方式可分为 3 种: 单磁铁特征、多磁铁随机特征、多磁铁编码特征. 单磁铁特征即为磁铁的不同摆放方式产生的磁场变化规律^[138], 定位精度可达厘米级, 但单个磁钉摆放方式类型有限, 难以实现大范围 (上百平方米) 定位. 多磁铁随机特征定位是基于环境中较多的磁性材料, 测量多位置的磁场强度形成磁场强度空间地图, 测量定位点附近的磁场变化规律, 查找地图实现

定位^[139,140]. 但由于不同位置磁指纹特征差异小, 定位精度仅能达到亚米级, 且系统鲁棒性差, 一旦环境中出现新磁铁, 则磁场地图失效. 多磁铁编码特征定位则将位置坐标信息编码到道路部署的磁性材料中, 优化设计定位磁编码地图, 可实现上百平方米范围的磁定位^[141~143]. 目前, 在多磁铁编码定位方案中, 系统考虑在道路中心间隔铺设单个磁钉, 利用相邻多磁钉极性编码存储道路绝对位置信息, 磁钉漏检概率高, 定位精度仅能达到分米级^[141~143]. 本文提出基于单点磁编码的定位机制, 在单个位置点部署多个磁铁或磁极, 并将该点位置信息编码至多个磁铁的磁极排列中. 下文分别基于磁钉和磁条设计了两实现方案.

在无线虚拟导轨中, 可考虑采用磁钉, 利用磁钉北极 (north pole, NP) 和南极 (south pole, SP) 极性编码排列特征表示道路位置, 并融合惯导、里程计和基站小区编号信息, 实现磁钉编码定位. 该方案车道传感器部署如图 8(a) 所示, 磁钉作为路面引导物, 规律地部署在车道离散标定定点处. 间隔相同距离设置一个标定点, 每个标定点均铺设一排磁钉, 一排磁钉的 NP 和 SP 性排列指示着道路位置坐标信息的二进制编码. 结合局部 MEC 平台的基站小区信息, 每 L 个小区为一组, 一组小区可复用同一套磁钉编码, 即小区编号和单排磁钉极性序列可唯一确定一个位置. 基于服务小区编号和磁钉联合定位, 可减小每个标定点磁钉编码的长度, 因为每组小区服务范围内各标定点的磁钉编码唯一即可. 而每组小区覆盖范围越小, 其中标定点约少, 磁钉编码的码长越小, 磁钉部署量随之减小. 另一方面, 基于服务小区编号和磁钉联合定位, 还有利于系统服务范围的扩展. 新增的服务范围可用不同的小区编号区分, 并复用同样的磁钉编码, 而原始道路磁钉部署不需改动. 参考每组磁编码小区数 (如 $L = 1$), 蜂窝小区基站站间距 (如 500 m), 道路十字路口间距 (如 150 m), 车道数 (如双向 4 车道), 使用多位二进数 (如 14 位) 唯一标识单小区内各位置标定点. 当标定点存在电磁干扰时, 该标定点磁场发生变化, 会出现磁钉漏检和误检现象. 此时, 无法正确识别该标定点磁钉编码, 出现定位误差. 考虑道路中沿路各标定点采用格雷码编码, 使相邻标定点仅有一个磁钉极性差异. 则磁钉漏检和误检时, 车载处理器根据前一标定点编码信息, 纠正当前标定点磁钉检测错误. 磁传感器安装方面, 车辆头部横向安装具有多个检测点的磁阻传感器, 考虑磁检测点间隔为 1 cm^[134], 参考奈奎斯特 (Nyquist) 采样定理, 一个磁钉至少需要两个磁检测点测得的数据, 才能估计磁钉极性, 则路面单个标定点处磁钉部署间隔为 2 cm^[138]. 若单个标定点处有一排 14 个磁钉, 其占用的横向距离为 26 cm. 考虑 2 m 车身宽度和 3 m 车道宽度, 车辆允许向左或向右的最大横向偏移为 50 cm, 为在车辆最大横向偏移范围内实现磁钉定位, 则数量车载磁传感器的磁检测点至少需要 128 个. 当车辆行驶过程中无法检测到磁钉信息时, 则结合惯导和测速计数据, 对磁钉定位进行补充和完善, 并在下一次检测到磁钉后对位置信息进行校准, 消除惯导和里程计定位产生的累计误差.

在基于磁钉序列的无线虚拟导轨中, 将磁钉所在的标定点作为系统导轨点, 管控车辆在导轨点的状态. 与 RFID 定位和图标定位方案相同, 本方案中导轨点间距与设备性能、算法性能、部署成本和轨迹规划等因素相关, 需根据实际参数研究确定.

在磁编码定位的无线虚拟导轨中, 也可利用磁条的多磁极, 实现以磁条编码为主, 惯导、里程计和基站信息辅助的融合定位. 该方案车道传感器部署如图 8(b) 所示, 磁条作为路面引导物, 沿车道中心线铺设, 每个磁条设置同样的长度. 根据磁条表面磁极分布不同, 将磁条分为不同类型. 部署磁条时, 需设置相邻磁条属于不同类型, 并将磁条连接点设置为标定点. 相邻磁条类型不同, 两者连接点磁场突变, 磁传感器识别突变点以确定标定点. 但是, 本方案中磁条类型数有限 (不超过 10 种), 原因如下: 一方面磁条的磁极总是成对出现, 且磁条磁极分布需平行于车道方向以时刻监测车辆左右偏移, 则车道中心线两侧的磁条内磁极总数量需相同. 磁条磁极数越多, 磁条宽度越宽, 磁条受路面移动物体磨损程度越大. 因此磁条宽度不宜过大, 以减小磁条磨损, 这使磁条磁极数受限, 磁条类型数受限. 另一

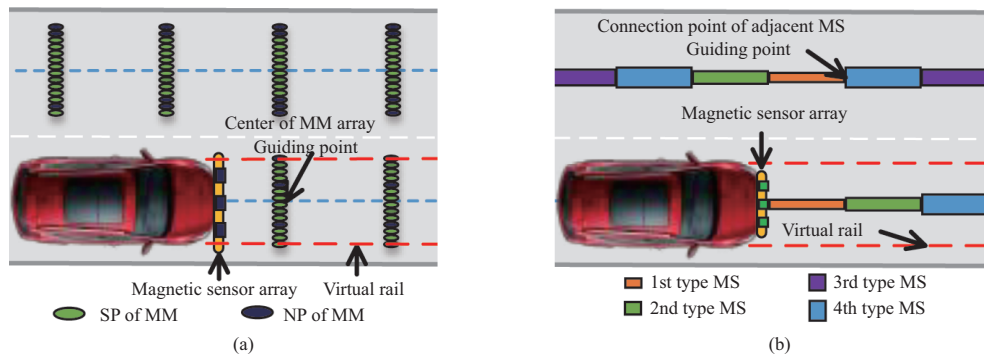


图 8 (网络版彩图) 基于磁编码的虚拟导轨. (a) 磁钉; (b) 磁条

Figure 8 (Color online) The virtual rail based on magnetic coding of magnetic marker. (a) Magnetic marker; (b) magnetic strip

方面, 相邻的不同类磁条间距近, 不同类磁条相邻时需保证同极性相连以保障磁场稳定, 则磁条表面磁极分布限制性强, 限制了道路部署的磁条类型. 因为磁条类型有限, 无法用单类磁条唯一确定各标定点位置坐标. 为克服磁条类型较少的缺点, 可沿车道中心线依次有规律部署不同类的磁条, 根据不同类磁条的部署顺序进行编码定位, 沿路多个相邻磁条所属类型形成的编码, 共同确定一个绝对位置. 与磁钉编码定位类似, 每 N 个蜂窝小区可复用同一套磁条编码, 基于服务小区信息和磁条联合定位, 可减小每个位置对应磁条编码的长度. 在磁条编码定位方案中, 编码长度设置和设备参数设置, 与磁钉编码定位类似^[134, 138, 144]. 车辆在道路中行驶时, 车载磁传感器检测道路磁条磁场强度, 确定磁条连接点和车辆横向偏移, 并识别相邻多磁条的类型, 结合小区编号得出磁条交点位置. 当磁传感器无法检测磁条磁场, 则结合惯导与里程计数据, 进行惯性导航定位.

在基于磁条循轨的无线虚拟导轨中, 不同类磁条连接点处磁场变化明显, 此处定位误差相对较小. 因此, 将导轨点设置为相邻的不同类磁条连接点, 而起点和终点间所有磁条的连接曲线为车辆虚拟导轨. 导轨点间距设置需考虑磁传感器和磁条性能、算法性能、部署成本和轨迹规划等因素, 需根据实际参数研究确定.

在基于磁钉或磁条的磁编码定位方案中, 磁传感器测得的磁场信息不受光线和天气影响, 磁编码定位算法复杂度低. 但是, 磁铁材料的磁场也会受环境电磁干扰, 会导致定位误差增大. 使用磁钉时, 磁钉间隔部署, 磁传感器需准确识别每一个磁钉极性. 与磁条编码相比, 磁钉编码更容易受电磁干扰影响, 所产生的定位误差更大. 虽然磁条编码定位受电磁干扰影响较小, 但磁条隐蔽性弱, 表面积更大, 比磁钉更容易磨损. 磨损严重时将减弱磁场, 需要进行更换. 因此磁条编码定位的维护难度大, 维护费用高.

3.5 基于基站感知的无线虚拟导轨

随着移动蜂窝网络应用的多样化发展, 基于设备终端位置信息实现的应用不断增加. 无线通信技术不断发展迭代, 基站定位技术也在不断优化与革新. 3GPP 发布的 R17 协议中规定, 蜂窝网络最高定位精度需达 0.2 m, 最低定位时延要求为 10 ms^[145]. 目前, 基站定位技术主要包含三边定位 (trilateration)、三角定位 (triangulation)、临近定位 (proximity)、场景识别 (scene analysis, SA) 和 A-GNSS^[146], 其中 A-GNSS 已在卫星定位方案介绍.

三边定位技术与 RFID 三边测距定位原理相同, 基于电磁信号参数计算出终端与至少 3 个定位参考基站间距, 以基站为中心, 间距为半径做圆, 多个圆的交点即为终端位置, 列出距离关系式求解出

表 1 各基站定位技术的定位精度对比

Table 1 The localization accuracy of different methods based on mobile network

Method	Accuracy (m)	Method	Accuracy (m)
RSS	> 100	Multi-RTT	> 10
ToA	> 100	AoA/AoD	> 0.1
TDoA	> 50	CID	> 100
E-OTD	> 50	E-CID	> 0.01
AFLT	> 50	SA	> 1
OTDoA	> 10	A-GNSS	> 1

终端位置^[147]. 基于电磁信号参数的测距方法有参考功率损耗的 RSS^[148], 和参考传输时间的到达时间 (time of arrival, ToA)^[149,150]、到达时间差 (time-difference of arrival, TDoA)^[151,152]、增强型观测时间差 (enhanced observed time difference, E-OTD)、高级前向链路三边定位 (advanced forward link trilateration, AFLT)、观测到达时间差 (observed TDoA, OTDoA)^[153~156] 和往返时间 (round trip time, multi-RTT). 三边定位算法简单和易于实现, 功率受环境影响大, 基站和终端时钟同步仅能达到百纳秒级, 测距误差大, 定位误差高于 10 m^[157]. 三角定位基于 MIMO 信号传输可测得的收发信号到达角 (angle of arrival, AoA) 或者发射角 (angle of departure, AoD) 信息, 至少需要两个参考基站才能实现终端定位, 两基站方位角射线延长线交点为终端位置. 基于直射信号 AoA 或者 AoD 的定位技术在具有高精度角分辨率的 5G 毫米波大规模天线阵中得到了广泛关注. 通常利用天线数较多基站侧信号传输的方位角实现定位, 此时 AoA 是由终端向基站发送上行信号, 而 AoD 则由基站向终端发射下行信号, 定位精度可达亚米级^[158]. 若增加终端天线数至 40 以上, 联合 AoA, AoD 和 ToA 三者信息, 可增加定位精度, 实现单基站的厘米级定位^[159,160], 这也为临近定位中的一种方法. 临近定位根据与终端临近的基站位置信息, 确定终端位置, 包括小区编号 (cell ID, CID) 和增强型小区编号 (enhanced-cell ID, E-CID) 两种技术. CID 技术是最早的临近定位技术, 在蜂窝网络中应用非常广泛, 定位系统识别终端所在蜂窝小区, 用基站位置来估计终端位置^[149]. 该方案成本和开销低, 在 2G/3G 时代应用广泛, 但定位精度严重受小区大小的影响, 在 3G/4G 的蜂窝网络部署下, 定位精度达 500 m. E-CID 定位技术是在 CID 的基础上, 融合其他收发信号参数提高定位精度, 如 ToA, AoA 和 AoD, 确定终端到基站的距离和方位, 实现单基站对终端实现定位^[146]. 场景识别又称指纹定位, 与 RFID 中的指纹定位原理相同, 信号经过多径传输和衰落后不同位置具有特有的 RSS, 以此实现定位, 该方案需建立庞大的指纹库, 且易受环境变化影响, 指纹库后续的维护成本较高, 常用于小范围室内定位, 定位精度为十米级^[161~164]. A-GNSS 定位需接收卫星信号, 适合于空旷广阔的乡镇环境, 城市环境中卫星信号易受遮挡, 定位精度为米级. 表 1 中对比了不同基站定位技术的精度, 总的来说, 基于 MIMO 系统实现 AoA/AoD 和 ToA 的 E-CID 定位, 其定位精度可达系统要求的厘米级, 且仅需要单个参考基站, 有望达到无线虚拟导轨系统定要要求. 在基站信号变弱时, MIMO 的 E-CID 定位精度降低, 融合惯导和里程计进行惯性导航定位, 有利于在不同场景下保证定位精度.

在无线虚拟导轨中, 以惯性导航定位辅助, 以基站 MIMO 系统的 E-CID 定位为主, 实现融合定位, 该方案车道部署如图 9 所示. 基站和终端均配置多天线, 并使用毫米波传输定位信号. 毫米波具有频率高、方向性强和衰减大的特性, 接收端仅能检测到直射信号和单次反射信号, 有利于提高接收信号的角度和时间测量精度. 基于基站定位方案中, 无需在车端和道路配置额外定位器件. 定位过程中, 基站与终端间传输指定定位信号, 基于信号传输空间路径, 即 AoA/AoD/ToA, 构建收发信号之间的关系

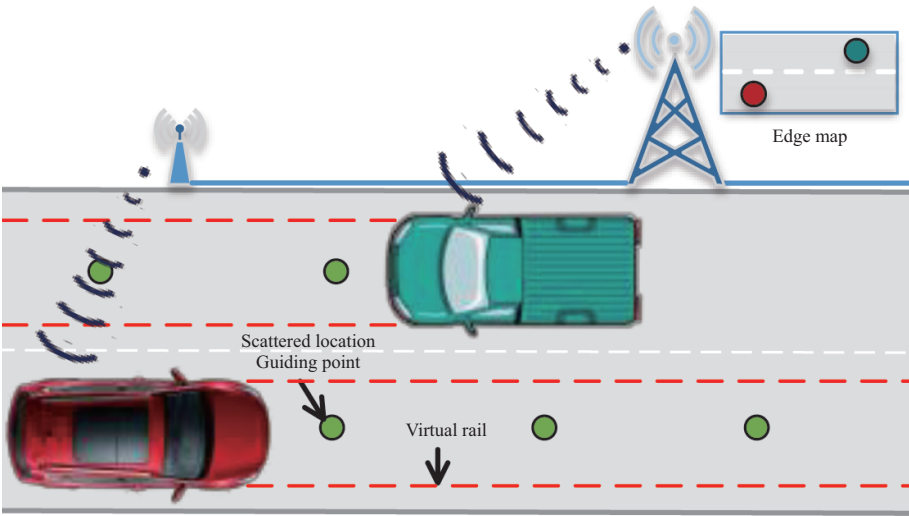


图 9 (网络版彩图) 基于基站的虚拟导轨

Figure 9 (Color online) The virtual rail based on cellular networks

式, 已知收发信号则可求解 $AoA/AoD/ToA$. 参考各基站位置坐标, 最终实现车辆定位. 当车辆与各基站的无线通信信道质量差, 直射径信号弱时, 可借助惯导和里程计进行辅助定位, 有望达到无线虚拟导轨系统定位性能要求.

在基站主导的融合定位中, 无线虚拟导轨系统中, 没有物理位置固定的路面单元的限制, 虚拟导轨和导轨点均用经纬度和海拔表示. 与卫星定位方案相同, 导轨点间隔设置可根据实际路况下车辆行驶轨迹控制效果, 并权衡系统计算能力, 合理设置导轨点间隔.

以基站定位实现的无线虚拟导轨系统, 其器件部署简单, 无需配置路面定位单元, 直接利用系统边缘移动网络设施实现定位, 并且系统中可按需求调整导轨点位置参数, 虚拟导轨规划更为灵活. 但是, 电磁波传输环境对定位误差影响较大, 当基站与车辆间存在遮挡物时, 定位精度会受到影响.

4 各方案对比

根据以上 5 种基于不同定位方案实现的无线虚拟导轨系统方案介绍, 结合每一种方案的定位基本原理、系统部署方案、定位技术与系统融合方式和各自优缺点, 表 2 对比了上述方案的性能.

总的来说, 5 种定位方案中卫星导航和基站感知方案不需要铺设路面单元, 能极大减少该路段路面改造, 并更灵活设置无线虚拟导轨和导轨点, 但其定位误差受电磁波传输环境影响较大, 在恶劣天气和密集建筑物场景下定位误差增大. 卫星导航适用于建筑物高度和密度低的郊区道路场景, 基站感知适用于便于 RSU 部署和单个 RSU 直射信号覆盖面积大的多车道路段. 与之相比, 在铺设了路面引导物的其余 3 种定位方案中, 路面单元附近的定位精度高, 能提高系统车辆控制效果. 图像循迹和磁条循轨方案能更好地引导车辆沿虚拟导轨行驶, 尽可能减小车辆横向偏移, 但前者受光线影响严重, 后者易受磁干扰且累计定位误差消除慢. 而 RFID 追踪和磁钉序列方案中路面离散的引导物能实现绝对定位, 但引导物中间区域定位误差大, 仅能用惯导和测速计定位, 存在定位累计误差, 仅当车辆移动到下一个路面引导物附近才能消除累计误差. RFID 追踪和单点磁编码适用于多隧道道路场景, 图标循迹适用于地面标识少的双向两车道道路场景.

表 2 无线虚拟导轨系统实现方案对比

Table 2 The comparison between different positioning technologies for ADWVR

Positioning technology	RFID	A-GNSS	Camera	Magnetic coding	Cellular network
Road sensor	RFID tag	—	QR code and Lane line	Magnetic marker or magnetic strip	—
Guiding point	Locations of RFID tags	Discrete locations in middle of each lane	Locations of QR codes	Midpoints of each magnetic marker array, connections of adjacent magnetic strip	Discrete locations in middle of each lane
Feasibility of virtual rail	Low	High	Low	Low	High
Factors deteriorating localization accuracy	Sundries on road	Severe weather and density buildings	Visibility on road	Electromagnetic interference	Severe weather and high-density buildings
Cost of positioning equipment on each vehicle (RMB)	1000	5000	5000	1000	5000
Cost of positioning equipment on road per kilometer (RMB)	8000	—	5000	1000	—
Positioning algorithm for centimeter-level accuracy	PDOA based on adjacent slots of RFID signal	A-GNSS in vacancy area	QR code and lane line detection using binocular camera	Magnetic field detection based on magnetic coding	E-CID based on MIMO
Computational complexity	Low	Low	High	Low	Medium
Application scenario	Roads in tunnel	Roads in vacancy area	Two-lane roads	Roads in tunnel	Multi-lane roads

虽然铺设 RFID 标签、磁编码的成本较大,但相应的车载信号检测器成本低。RFID 追踪算法复杂度大约为每秒 10 亿次的浮点运算 (giga floating-point operations per second, GFLOPS) 的 10 量级,其定位精度受地面障碍物影响大^[165,166]。单点磁编码方案利用磁感应原理,结合车辆经过区域的磁场强度,推算车辆所在位置,算法复杂度为 10GFLOPS 量级^[167]。这两种方案车载定位设备成本低,算法简单易实现,但磁定位容易受电磁环境影响。卫星导航方案虽然不需部署路面单元,但每辆车均需安装成本较高的卫星信号接收终端以实现定位,且受城市道路环境影响大,算法复杂度为 10GFLOPS 量级^[168,169]。而图像循迹方案不仅需要较高的道路标识绘制成本,每辆车还需要安装成本较高的摄像机和高性能图像处理芯片,算法复杂度为 1000GFLOPS 量级^[169]。而基站感知方案也不需部署路面单元,但车辆需额外配置多天线设备以增加定位精度,且会占用车网通信资源,算法复杂度为 100GFLOPS 量级^[169,170]。该方案能灵活设置系统虚拟导轨和导轨点,将 RSU 部署至多车道路段边,定位精度受城市环境影响小。

基于各定位技术的实现方案具有不同特点与优缺点,适用于不同系统道路环境场景。系统可组合不同方案,在不同场景下采用不同定位技术实现,以提高全局车辆的准确定位感知和控制。

5 总结

目前的自动驾驶技术方案在安全性和高效性方面存在不足, 借鉴轨道交通的强控制性, 本文提出了感通算融合的无线虚拟导轨自动驾驶系统. 系统统一为各车辆规划行车虚拟导轨, 并由移动网络实时引导和控制车辆行驶. 虚拟导轨中不仅涵盖了车辆行驶路线, 还规定了路线上的离散导轨点, 指示车辆到达每个导轨点的时间、车身姿态和运动状态等信息. 系统四级架构按集中式分级管控全局资源, 协同各级设备快速高效调度车辆; 以高可靠低时延无线通信为媒介, 实现车辆与平台间高时效无差错的信息传递; 在厘米级车辆定位基础上, 实现车辆状态准确感知, 以更精确引导车辆沿预设虚拟导轨指示行驶. 定位信息是系统车辆控制的关键参数, 并影响系统设备部署方案. 为实现系统要求的高精度定位, 本文分别给出了基于 RFID、卫星、图像、磁编码和基站 5 种定位技术的系统实现方案, 以供参考, 并对比了各方案特点和优缺点.

无线虚拟导轨以全局车辆和资源的统筹优化调度为核心, 车辆调度兼具强控性和灵活性, 能促进未来智能车网交通发展趋势, 在减少交通事故、缓解交通阻塞、提高交通效率等方面有着至关重要的作用.

参考文献

- 1 World Health Organization. Global Status Report on Road Safety 2018. 2018
- 2 Han W, Zhao J. Driver behaviour and traffic accident involvement among professional urban bus drivers in China. *Trans Res Part F-Traf Psychol Behav*, 2020, 74: 184–197
- 3 INRIX. 2019 Global Traffic Scorecard. 2019
- 4 Falcocchio J C, Levinson H S. Road Traffic Congestion: A Concise Guide. Berlin: Springer, 2015
- 5 Guo J, Kurup U, Shah M. Is it safe to drive? An overview of factors, metrics, and datasets for driveability assessment in autonomous driving. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2020, 21: 3135–3151
- 6 Badue C, Guidolini R, Carneiro R V, et al. Self-driving cars: a survey. *Expert Syst Appl*, 2021, 165: 113816
- 7 Wang J, Liu J, Kato N. Networking and communications in autonomous driving: a survey. *IEEE Commun Surv Tut*, 2019, 21: 1243–1274
- 8 Qi Y, Zhou Y, Liu Y F, et al. Traffic-aware task offloading based on convergence of communication and sensing in vehicular edge computing. *IEEE Int Things J*, 2021, 8: 17762–17777
- 9 Du Q, Song H, Zhu X. Social-feature enabled communications among devices toward the smart IoT community. *IEEE Commun Mag*, 2019, 57: 130–137
- 10 Su Y, Liu Y, Zhou Y, et al. Broadband LEO satellite communications: architectures and key technologies. *IEEE Wireless Commun*, 2019, 26: 55–61
- 11 Waymo. Waymo Safety Report. 2020
- 12 Tesla Deaths. Tesla deaths is a record of Tesla accidents that involved a driver, occupant, cyclist, motorcyclist, or pedestrian death, whether or not the Tesla or its driver were at fault. 2022. <https://www.tesladeaths.com/>
- 13 Wikipedia. Death of Elaine Herzberg. 2018. https://en.wikipedia.org/wiki/Death_of_Elaine_Herzberg
- 14 Baidu. A Whitepaper on Automated Driving Safety. 2020
- 15 Liu L, Zhou Y, Yuan J, et al. Economically optimal MS association for multimedia content delivery in cache-enabled heterogeneous cloud radio access networks. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2019, 37: 1584–1593
- 16 Liu L, Zhou Y, Zhuang W, et al. Tractable coverage analysis for hexagonal macrocell-based heterogeneous UDNs with adaptive interference-aware CoMP. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2019, 18: 503–517
- 17 Xia B, Wang J, Xiao K, et al. Outage performance analysis for the advanced SIC receiver in wireless NOMA systems. *IEEE Trans Veh Technol*, 2018, 67: 6711–6715
- 18 Zhou Y, Liu H, Pan Z, et al. Cooperative multicast with location aware distributed mobile relay selection: performance analysis and optimized design. *IEEE Trans Veh Technol*, 2017, 66: 8291–8302
- 19 Zhou Y, Liu H, Pan Z, et al. Energy-efficient two-stage cooperative multicast: effect of user density. *IEEE Trans*

- Veh Technol, 2016, 65: 7297–7307
- 20 Chen N, Wang M, Zhang N, et al. Energy and information management of electric vehicular network: a survey. *IEEE Commun Surv Tut*, 2020, 22: 967–997
 - 21 Ahmed E, Gharavi H. Cooperative vehicular networking: a survey. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2018, 19: 996–1014
 - 22 Liu J H, Liu L, Zhou Y Q. Communication delay-aware network topology adaptation for cooperative control of vehicular platoons. In: *Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2021. 1–6
 - 23 Ma F, Wang J, Zhu S, et al. Distributed control of cooperative vehicular platoon with nonideal communication condition. *IEEE Trans Veh Technol*, 2020, 69: 8207–8220
 - 24 China Industry Innovation Alliance for the Intelligent and Connected Vehicles. White Paper on High-precision Satellite Positioning of Intelligent Connected Vehicles 2020. 2020 [中国智能网联汽车产业创新联盟. 智能网联汽车高精度卫星定位白皮书 2020. 2020]
 - 25 3GPP. Enhancement of 3GPP support for V2X scenarios. TS 22.186 V16.2.0, 2019. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3180>
 - 26 Schwarzbach P, Tauscher P, Michler A, et al. V2X based probabilistic cooperative position estimation applying GNSS double differences. In: *Proceedings of International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS)*, 2019. 1–6
 - 27 Liu H, Ye Q, Wang H, et al. A precise and robust segmentation-based lidar localization system for automated urban driving. *Remote Sens*, 2019, 11: 1348–1365
 - 28 Kim J, Jeon M H, Cho Y, et al. Dark synthetic vision: lightweight active vision to navigate in the dark. *IEEE Robot Autom Lett*, 2021, 6: 143–150
 - 29 ZhiHu. Map creation and positioning with modern manufacturing techniques and equipped lidar. 2019. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/68175765>
 - 30 Tencent. Here comes the first smart Metro train, and the departure interval can be reduced to 65 seconds, and the gap between two workshops can be reduced to 40 meters. 2021. <https://new.qq.com/rain/a/20211011A04AMD00>
 - 31 Liu K, Wang X C, Qu Z. Research on multi-objective optimization and control algorithms for automatic train operation. *Energies*, 2019, 12: 3842–3863
 - 32 Dumitriu M. Influence of the longitudinal and lateral suspension damping on the vibration behaviour in the railway vehicles. *Arch Mech Eng*, 2015, 62: 115–140
 - 33 Yin J, Tang T, Yang L, et al. Research and development of automatic train operation for railway transportation systems: a survey. *Transp Res Part C-Emerg Technol*, 2017, 85: 548–572
 - 34 Chen X, Ma W, Xie G, et al. A survey of control algorithm for automatic train operation. In: *Proceedings of the 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2019. 2405–2410
 - 35 Singh P, Dulebenets M A, Pasha J, et al. Deployment of autonomous trains in rail transportation: current trends and existing challenges. *IEEE Access*, 2021, 9: 91427–91461
 - 36 Han D, Wang J, Yan Y, et al. Velocity planning of the autonomous rail rapid transit with consideration of obstacles. In: *Proceedings of the 4th CAA Conference on Vehicle Control and Intelligence (CVCI)*, 2020. 35–40
 - 37 Vis I F A. Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems. *Eur J Oper Res*, 2006, 170: 677–709
 - 38 Wikipedia. Automated guided vehicle. 2022. https://en.wikipedia.org/wiki/Automated_guided_vehicle
 - 39 SouHu. 12 ways! Do you know how a robot navigates. 2020. https://www.sohu.com/a/380834723_120116143
 - 40 ZhiHu. Discuss four common AGV navigation methods and their advantages and disadvantages. 2020. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/267405519>
 - 41 CSDN. Design of magnetic strip navigation omnidirectional robot. 2017. <https://blog.csdn.net/wangguchao/article/details/78658364>
 - 42 Chinaagv. The difference between laser navigation forklift AGV with and without reflectors. 2020. <https://m.chinaagv.com/news/detail/202006/13766.html>
 - 43 Ding G, Lu H, Bai J, et al. Development of a high precision UWB/vision-based AGV and control system. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE)*, 2020. 99–103
 - 44 Kazerouni I A, Fitzgerald L, Dooly G, et al. A survey of state-of-the-art on visual SLAM. *Expert Syst Appl*, 2022, 205: 117734
 - 45 Chan S H, Wu P T, Fu L C. Robust 2D indoor localization through laser SLAM and visual SLAM fusion. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2018. 1263–1268

- 46 Khan M U, S. Zaidi A A, Ishtiaq A, et al, A comparative survey of LiDAR-SLAM and LiDAR based sensor technologies. In: Proceedings of Mohammad Ali Jinnah University International Conference on Computing (MAJICC), 2021. 1–8
- 47 Oyekanlu E A, Smith A C, Thomas W P, et al. A review of recent advances in automated guided vehicle technologies: integration challenges and research areas for 5G-based smart manufacturing applications. *IEEE Access*, 2020, 8: 202312
- 48 DOCA. Shentong Express sorting robot is popular with 99% accuracy and cute appearance. 2017. https://www.sohu.com/a/133759303_520348
- 49 Yang Q, Lian Y, Xie W. Hierarchical planning for multiple AGVs in warehouse based on global vision. *Simul Model Pract Theory*, 2020, 104: 102124
- 50 ZhiHu. Efficient robots that can quickly sort deliveries and climb shelves. Are they taking people's jobs away? 2019. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/66381255>
- 51 Du E, Ren Y, Research on control algorithm for laser guided AGV based on proximal policy. In: Proceedings of Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC), 2020. 1–7
- 52 Hu X, Luo Z, Jiang W. AGV localization system based on ultra-wideband and vision guidance. *Electronics*, 2020, 9: 448
- 53 Qi Y, Tian L, Zhou Y, et al. Mobile edge computing-assisted admission control in vehicular networks: the convergence of communication and computation. *IEEE Veh Technol Mag*, 2019, 14: 37–44
- 54 Hussain B, Du Q, Imran A, et al. Artificial intelligence-powered mobile edge computing-based anomaly detection in cellular networks. *IEEE Trans Ind Inf*, 2020, 16: 4986–4996
- 55 Gu Y, Yao Y, Li C, et al. Modeling and analysis of stochastic mobile-edge computing wireless networks. *IEEE Int Things J*, 2021, 8: 14051–14065
- 56 ZhiHu. The difference between autopilot dynamic HD maps and regular maps. 2019. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/86136288>
- 57 ZhiHu. What is the difference between a high precision map and a normal navigation map? Introduce domestic high precision map professional platform. 2022. <https://www.zhihu.com/question/284050134>
- 58 Cui L, Chen Z, Wang A B, et al. Development of a robust cooperative adaptive cruise control with dynamic topology. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2022, 23: 4279–4290
- 59 Luan Z, Zhang J, Zhao W, et al. Trajectory tracking control of autonomous vehicle with random network delay. *IEEE Trans Veh Technol*, 2020, 69: 8140–8150
- 60 Tedeschi A, Calcaterra S, Benedetto F. Ultrasonic RAdar system (URAS): arduino and virtual reality for a light-free mapping of indoor environments. *IEEE Sens J*, 2017, 17: 4595–4604
- 61 Liu Z H, Gao B C. Radar sensors in automatic driving cars. In: Proceedings of the 5th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT), 2020. 239–242
- 62 Chen S, Liu B, Feng C, et al. 3D point cloud processing and learning for autonomous driving: impacting map creation, localization, and perception. *IEEE Signal Process Mag*, 2021, 38: 68–86
- 63 Liu L, Lu S, Zhong R, et al. Computing systems for autonomous driving: state of the art and challenges. *IEEE Int Things J*, 2021, 8: 6469–6486
- 64 3GPP. Study on scenarios and requirements for next generation access technologies. TR 38.913 V14.2.0, 2017. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2996>
- 65 Sun B, Zhou Y, Yuan J, et al. High order PSK modulation in massive MIMO systems with 1-Bit ADCs. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2021, 20: 2652–2669
- 66 Sun B, Zhou Y, Yuan J, et al. Interference cancellation based channel estimation for massive MIMO systems with time shifted pilots. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2020, 19: 6826–6843
- 67 Polyanskiy Y, Poor H V, Verdú S. Channel coding rate in the finite blocklength regime. *IEEE Trans Inform Theory*, 2010, 56: 2307–2359
- 68 Sybis M, Wesolowski K, Jayasinghe K, et al. Channel coding for ultra-reliable low-latency communication in 5G systems. In: Proceedings of the 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 2016. 1–5
- 69 Zhao X, Xu K, Ma S, et al. Joint transceiver optimization for IRS-aided MIMO communications. *IEEE Trans Commun*, 2022, 70: 3467–3482
- 70 Gong S, Xing C, Zhao X, et al. Unified IRS-aided MIMO transceiver designs via majorization theory. *IEEE Trans*

- Signal Process, 2021, 69: 3016–3032
- 71 Xing C, Zhao X, Wang S, et al. Hybrid transceiver optimization for multi-hop communications. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2020, 38: 1880–1895
 - 72 Marzetta T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2010, 9: 3590–3600
 - 73 Yang S, Hanzo L. Fifty years of MIMO detection: the road to large-scale MIMOs. *IEEE Commun Surv Tut*, 2015, 17: 1941–1988
 - 74 Zheng K, Zhao L, Mei J, et al. Survey of large-scale MIMO systems. *IEEE Commun Surv Tut*, 2015, 17: 1738–1760
 - 75 Zhou X, Wang Z, Shen H, et al. Robust adaptive path-tracking control of autonomous ground vehicles with considerations of steering system backlash. *IEEE Trans Intell Veh*, 2022, 7: 315–325
 - 76 Gasgoo. Under the background of autonomous driving, how can high-precision GNSS technology make vehicles more intelligent? 2020. <https://m.gasgoo.com/news/70198491.html>
 - 77 Penguin-Sim world. Fundamentals of autonomous driving-environment awareness and real-time positioning. 2018. <https://cloud.tencent.com/developer/news/188615>
 - 78 Zafari F, Gkelias A, Leung K K. A survey of indoor localization systems and technologies. *IEEE Commun Surv Tut*, 2019, 21: 2568–2599
 - 79 Soonjun S, Promwong S, Cherntanomwong P. Improvement of RFID based location fingerprint technique for indoor environment. In: *Proceedings of the 9th International Symposium on Communications and Information Technology*, 2009. 916–921
 - 80 Phimmasean S, Chuenurajit T, Cherntanomwong P. Indoor localization system based on fingerprint technique using RFID passive tag. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2013. 1–6
 - 81 Megalou S, Tzitzis A, Siachalou S, et al. Fingerprinting localization of RFID tags with real-time performance-assessment, using a moving robot. In: *Proceedings of the 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2019. 1–5
 - 82 Chhetri B T, Alsadoon A, Prasad P W C, et al. Enhanced weighted centroid localization in RFID Technology: patient movement tracking in hospital. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS)*, 2019. 910–915
 - 83 Zhang B, Tang S, Jin M, et al. Research on mine robot positioning based on weighted centroid method. In: *Proceedings of International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS)*, 2018. 17–20
 - 84 Lim H S, Choi B S, Lee I M. An efficient localization algorithm for mobile robots based on RFID system. In: *Proceedings of SICE-ICASE International Joint Conference*, 2006. 5945–5950
 - 85 Babic Z, Ljubojevic M, Risojevic V. Indoor RFID localization improved by motion segmentation. In: *Proceedings of the 7th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA)*, 2011. 271–276
 - 86 Hu B, Peng H, Sun Z. LANDMARC localization algorithm based on weight optimization. In: *Proceedings of Chinese Journal of Electronics*, 2018. 1291–1296
 - 87 Floarea D, Sgarciu V. Indoor positioning using cell of origin and LANDMARC approach. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, 2020. 1–5
 - 88 Yang L, Liu Q, Xu J, et al. An indoor RFID location algorithm based on support vector regression and particle swarm optimization. In: *Proceedings of the 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, 2018. 1–6
 - 89 Zhang Y, Ma Y, Liu K, et al. RFID based vehicular localization for intelligent transportation systems. In: *Proceedings of IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, 2019. 267–272
 - 90 Qi C, Amato F, Alhassoun M, et al. Breaking the range limit of RFID localization: phase-based positioning with tunneling tags. In: *Proceedings of IEEE International Conference on RFID (RFID)*, 2019. 1–8
 - 91 Li C. RePos: relative position estimation of UHF-RFID tags for item-level localization. In: *Proceedings of IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, 2019. 357–361
 - 92 DiGiampaolo E, Martinelli F. Multiple baseline synthetic array for UHF RFID localization. In: *Proceedings of IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, 2019. 348–352
 - 93 Ma Y, Wang B, Pei S, et al. An indoor localization method based on AOA and PDOA using virtual stations in multipath and NLOS environments for passive UHF RFID. *IEEE Access*, 2018, 6: 31772–31782
 - 94 Morales J J, Kassas Z M. Tightly coupled inertial navigation system with signals of opportunity aiding. *IEEE Trans*

- Aerosp Electron Syst, 2021, 57: 1930–1948
- 95 Wang X, Gilliam C, Kealy A, et al. Probabilistic map matching for robust inertial navigation aiding. 2022. arXiv:2203.16932
- 96 Mahato S, Santra A, Dan S, et al. Preliminary results on the performance of cost-effective GNSS receivers for RTK. In: Proceedings of URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC), 2019. 1–4
- 97 Suzuki T. Time-relative RTK-GNSS: GNSS loop closure in pose graph optimization. IEEE Robot Autom Lett, 2020, 5: 4735–4742
- 98 Chiang K W, Tsai G J, Chu H J, et al. Performance enhancement of INS/GNSS/refreshed-SLAM integration for acceptable lane-level navigation accuracy. IEEE Trans Veh Technol, 2020, 69: 2463–2476
- 99 Alam N, Kealy A, Dempster A G. An INS-aided tight integration approach for relative positioning enhancement in VANETs. IEEE Trans Intell Transp Syst, 2013, 14: 1992–1996
- 100 Malleswaran M, Deborah S A, Manjula S, et al. Integration of INS and GPS using radial basis function neural networks for vehicular navigation. In: Proceedings of the 11th International Conference on Control Automation Robotics & Vision, 2010. 2427–2430
- 101 Ma X Y, Liu B Q. Design of an INS aided high dynamic GPS receiver. In: Proceedings of International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011. 1404–1407
- 102 Yadav N C, Shanmukha A, Amruth B M, et al. Development of GPS/INS integration module using kalman filter. In: Proceedings of International Conference on Algorithms, Methodology, Models and Applications in Emerging Technologies (ICAMMAET), 2017. 1–5
- 103 Yang Y, Zhong Y, Gao Y. Model predictive filter based neural networks for INS/GPS integrated navigation during GPS outages. In: Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC), 2017. 469–472
- 104 Wang G, Xu X, Yao Y, et al. A novel BPNN-based method to overcome the GPS outages for INS/GPS system. IEEE Access, 2019, 7: 82134–82143
- 105 Behroozpour B, Sandborn P A M, Wu M C, et al. Lidar system architectures and circuits. IEEE Commun Mag, 2017, 55: 135–142
- 106 Hsu C P, Li B, Solano-Rivas B, et al. A review and perspective on optical phased array for automotive LiDAR. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2021, 27: 1–16
- 107 Sivaraman S, Trivedi M M. Looking at vehicles on the road: a survey of vision-based vehicle detection, tracking, and behavior analysis. IEEE Trans Intell Transp Syst, 2013, 14: 1773–1795
- 108 ZhiHu. Into the autopilot sensor (2) – millimeter wave radar. 2022. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/346374177>
- 109 ZhiHu. Into the autopilot sensor (1) – millimeter wave radar. 2022. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/139350599>
- 110 Fei D, Chen J L, Liu D S, et al. Depth camera-based location and restoration of special surface. Acta Opt Sin, 2020, 21: 116–125 [费点, 陈建林, 刘东生, 等. 基于深度相机的特殊表面定位与修复. 光学学报, 2020, 21: 116–125]
- 111 Zekavat R, Buehrer R M. Handbook of Position Location Theory, Practice, and Advances. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2011
- 112 Jin Z Z, Zhou W H, Zheng J, et al. Mobile robot control system based on ROS. Light Indust Mach, 2021, 39: 4 [金珍珍, 周卫华, 郑军, 等. 基于 ROS 的移动机器人控制系统. 轻工机械, 2021, 39: 4]
- 113 Wang Y, Chen G L, Li X Y, et al. An indoor location method of monocular vision assisted by camera calibration. Bull Surv Map, 2018, 35–40 [王勇, 陈国良, 李晓园, 等. 一种相机标定辅助的单目视觉室内定位方法. 测绘通报, 2018, 35–40]
- 114 Wu J T, Xu Y, Zhong C X, et al. The invention relates to a binocular stereo vision ranging system for odometer. Meas Tech, 2019, 542: 32–35 [吴锦铁, 许原, 仲崇霞, 等. 一种用于里程计量的双目立体视觉测距系统. 计量技术, 2019, 542: 32–35]
- 115 Bresson G, Alsayed Z, Yu L, et al. Simultaneous localization and mapping: a survey of current trends in autonomous driving. IEEE Trans Intell Veh, 2017, 2: 194–220
- 116 Schmid C, Mohr R, Bauckhage C. Evaluation of interest point detectors. Int J Comput Vision, 2000, 37: 151–172
- 117 Zhuang Y, Kang Y, Huang L, et al. A geocoding framework for indoor navigation based on the QR code. In: Proceedings of Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location-Based Services (UPINLBS), 2018. 1–4
- 118 Zhang Y, Zhu Z W. Study on AGV control system with two-dimensional code navigation. J Shandong Agr Univ Nat Sci Ed, 2019, 050: 441–444 [张艳, 朱振伟. 二维码导航 AGV 控制系统研究. 山东农业大学学报: 自然科学版,

- 2019, 050: 441–444]
- 119 Yu X Y, Xie W. Real-time recovery and recognition of motion blurry QR code image based on fractional order deblurring method. *IET Image Process*, 2019, 13: 923–930
 - 120 Goronzy G, Pelka M, Hellbrück H. QRPos: indoor positioning system for self-balancing robots based on QR codes. In: *Proceedings of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2016. 1–8
 - 121 Introduction to the development of on-board chips for autonomous vehicles. 2021. <http://2025ad.cn/article/MTAyMTE=.html5>
 - 122 Wikichip. FSD Chip-Tesla. 2019. [https://en.wikichip.org/wiki/tesla_\(car_company\)/fsd_chip](https://en.wikichip.org/wiki/tesla_(car_company)/fsd_chip)
 - 123 Gridseth M, Barfoot T D. Keeping an eye on things: deep learned features for long-term visual localization. *IEEE Robot Autom Lett*, 2022, 7: 1016–1023
 - 124 Mennel L, Symonowicz J, Wachter S, et al. Ultrafast machine vision with 2D material neural network image sensors. *Nature*, 2020, 579: 62–66
 - 125 Zhang H. Research on lane keeping control algorithms based on machine vision. Dissertation for Master's Degree. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020 [张浩. 基于机器视觉的车道保持控制算法研究. 硕士学位论文. 成都: 电子科技大学, 2020]
 - 126 Hogpracha W, Vongpradhip S. Recognition system for QR code on moving car. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE)*, 2015. 14–18
 - 127 Wang B F. Research on vehicle and lane line recognition based on machine learning and sensor fusion. Dissertation for Ph.D. Degree. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017 [王宝峰. 基于机器学习与传感器融合的车辆与车道线识别研究. 博士学位论文. 北京: 北京理工大学, 2017]
 - 128 Chen Z, Li L, Huang X. Building an autonomous lane keeping simulator using real-world data and end-to-end learning. *IEEE Intell Transp Syst Mag*, 2020, 12: 47–59
 - 129 Nam J, Lee W, Jung E, et al. Magnetic navigation system utilizing a closed magnetic circuit to maximize magnetic field and a mapping method to precisely control magnetic field in real time. *IEEE Trans Ind Electron*, 2018, 65: 5673–5681
 - 130 Im D, Ryoo Y, Park S, et al. Development of magnetic position sensor for unmanned driving of robotic vehicle. In: *Proceedings of SENSORS*, 2009
 - 131 Lin Z B. CHN Patent, CN108052107B, 2018
 - 132 Elecfans. Types and applications of magnetic sensors. 2020. <http://www.elecfans.com/d/1170458.html>
 - 133 Xu H G. Research on vehicle autonomous guidance system based on magnetic sensor array. Dissertation for Ph.D. Degree. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009 [徐海贵. 基于磁阻传感器阵列的车辆自主导航系统研究. 博士学位论文. 上海: 上海交通大学, 2009]
 - 134 Shang S, Dai X A, Wang J B, et al. Research on the navigation system of the cowshed cleaning robot based on magnetic nail array. *Mach Electron*, 2021, 39: 71–75 [尚帅, 戴兴安, 王锦博, 等. 基于磁钉阵列的牛舍清洁机器人导航系统研究. *机械与电子*, 2021, 39: 71–75]
 - 135 Song Z, Wu X Y, Xu T T, et al. A new method of AGV navigation based on kalman filter and a magnetic nail localization. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2016. 952–957
 - 136 Taghvaeeyan S, Rajamani R. Magnetic sensor-based large distance position estimation with disturbance compensation. *IEEE Sens J*, 2015, 15: 4249–4258
 - 137 Song S, Li B, Qiao W, et al. 6-D magnetic localization and orientation method for an annular magnet based on a closed-form analytical model. *IEEE Trans Magn*, 2014, 50: 1–11
 - 138 Ortner M, Ribeiro M, Spitzer D. Absolute long-range linear position system with a single 3-D magnetic field sensor. *IEEE Trans Magn*, 2019, 55: 1–4
 - 139 Gozick B, Subbu K P, Dantu R, et al. Magnetic maps for indoor navigation. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2011, 60: 3883–3891
 - 140 Lee N, Ahn S, Han D. AMID: accurate magnetic indoor localization using deep learning. *Sensors*, 2018, 18: 1598–1613
 - 141 Wu C Z. Research on information fusion and control technology of lane keeping system based on magnetic spike navigation. Dissertation for Ph.D. Degree. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2002 [吴超仲. 基于磁道钉导航的车道保持系统信息融合与控制技术研究. 博士学位论文. 武汉: 武汉理工大学, 2002]
 - 142 Cao H, Wu C Z. Study on method of magnetic markers coding and vehicle location for AHS. *J Wuhan Univ Technol Transp Sci Eng*, 2006, 30: 401–404 [曹辉, 吴超仲. 自动公路系统的磁道钉编码及定位方法研究. *武汉理工大学学报*

- 报: 交通科学与工程版, 2006, 30: 401–404]
- 143 Lv X W. Research on unmanned public transport system in park based on magnetic nail map navigation. Dissertation for Ph.D. Degree. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017 [吕修文. 基于磁钉地图导航的园区无人公交系统的研究. 博士学位论文. 上海: 上海交通大学, 2017]
- 144 Sun Y J. Design and application of magnetic navigation AGV vehicle control system. *Modern Manuf Technol Equipment*, 2022, 58: 190–193 [孙宜敬. 磁导航 AGV 车载控制系统的设计与应用. *现代制造技术与装备*, 2022, 58: 190–193]
- 145 3GPP. Study on scenarios and requirements of in-coverage, partial coverage, and out-of-coverage NR positioning use cases. TR 38.845 V17.0.0, 2021. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3806>
- 146 3GPP. NG radio access network (NG-RAN); Stage 2 functional specification of user equipment (UE) positioning in NG-RAN. TS 38.305 V17.4.0, 2023. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3310>
- 147 Rusli M E, Ali M, Jamil N, et al. An improved indoor positioning algorithm based on RSSI-trilateration technique for internet of things (IoT). In: *Proceedings of International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)*, 2016. 72–77
- 148 Jeong S, Lee H, Kang T, et al. RSS-based LTE base station localization using single receiver in environment with unknown path-loss exponent. In: *Proceedings of International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 2020. 958–961
- 149 Mailaender L. Comparing Geo-location bounds for TOA, TDOA, and round-trip TOA. In: *Proceedings of the 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2007. 1–5
- 150 Leca C L, Nicolaescu I, Rincu C I, et al. Determining optimum base stations configuration for TOA localization inside cellular networks. In: *Proceedings of International Conference on Communications (COMM)*, 2016. 233–236
- 151 Kim S, Chong J W. An efficient TDOA-based localization algorithm without synchronization between base stations. *Int J Distr Sens Netw*, 2015, 11: 832351
- 152 Radnosrati K, Fritsche C, Gunnarsson F, et al. Localization in 3GPP LTE based on one RTT and one TDOA observation. *IEEE Trans Veh Technol*, 2020, 69: 3399–3411
- 153 del Peral-Rosado J A, Raulefs R, Lopez-Salcedo J A, et al. Survey of cellular mobile radio localization methods: from 1G to 5G. *IEEE Commun Surv Tut*, 2018, 20: 1124–1148
- 154 3GPP. TS 36.211. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Physical channels and modulation. TS 36.211 V17.3.0, 2023. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2425>
- 155 Gadka P, Sadowski J, Stefanski J. Detection of the first component of the received LTE signal in the OTDoA method. *Wireless Commun Mobile Comput*, 2019, 2019: 1–12
- 156 Kwak M, Chong J. A new double two-way ranging algorithm for ranging system. In: *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content*, 2010. 470–473
- 157 Synchronize The World. Analysis and summary of clock synchronization requirements for future 5G communication networks. 2017. <https://www.syn029.com/h-nd-876.html>
- 158 Zheng X, Liu A, Lau V. Joint channel and location estimation of massive MIMO system with phase noise. *IEEE Trans Signal Process*, 2020, 68: 2598–2612
- 159 Lin Z, Lv T, Zhang J A, et al. Tensor-based high-accuracy position estimation for 5G mmWave massive MIMO systems. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2020. 1–6
- 160 Liu A, Lian L, Lau V, et al. Cloud-assisted cooperative localization for vehicle platoons: a turbo approach. *IEEE Trans Signal Process*, 2022, 68: 605–620
- 161 Jiang X, Liu Y, Wang X. An enhanced location estimation approach based on fingerprinting technique. In: *Proceedings of International Conference on Communications and Mobile Computing*, 2010. 424–427
- 162 Al-Rashdan W Y, Tahat A. A comparative performance evaluation of machine learning algorithms for fingerprinting based localization in DM-MIMO wireless systems relying on big data techniques. *IEEE Access*, 2020, 8: 109522
- 163 Vo Q D, De P. A survey of fingerprint-based outdoor localization. *IEEE Commun Surv Tut*, 2016, 18: 491–506
- 164 Zhu H Z, Liu F Q, Zhou H. Indoor location service based on fingerprinting and distance relative attenuation model. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 2014.

341–344

- 165 Khudhair A A, Jabbar S Q, Sulttan M Q, et al. Wireless indoor localization systems and techniques: survey and comparative study. *Indones J Electr Eng Comput Sci*, 2016, 3: 392–409
- 166 Chen R, Huang X, Zhou Y, et al. UHF-RFID-based real-time vehicle localization in GPS-less environments. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2022, 23: 9286–9293
- 167 Tariq Z B, Cheema D M, Kamran M Z, et al. Non-GPS positioning systems. *ACM Comput Surv*, 2017, 50: 1–34
- 168 Wang Z, Xia Y, Li J, et al. A new method of integer parameter estimation in linear models with applications to GNSS high precision positioning. *IEEE Trans Signal Process*, 2021, 69: 4567–4579
- 169 Lu Y, Ma H, Smart E, et al. Real-time performance-focused localization techniques for autonomous vehicle: a review. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2022, 23: 6082–6100
- 170 Jabbari M R, Taban M R, Gazor S. A robust TSWLS localization of moving target in widely separated MIMO radars. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2022. doi: 10.1109/TAES.2022.3194112

Autonomous driving with virtual rail – a wireless tracked and controlled self-driving vehicle system based on the integration of communication, sensing, and computing

Yiqing ZHOU^{1,2,3*}, Lu WANG^{1,2,3}, Jinhong YUAN⁴, Jinglin SHI^{1,2,3} & Dengpan ZHAO⁵

1. *State Key Lab of Processors, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

2. *Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

4. *School of Electrical Engineering and Telecommunications, University of New South Wales, Sydney NSW 2052, Australia;*

5. *A Certain Unit of the PLA, Shigatse 858600, China*

* Corresponding author. E-mail: zhouyiqing@ict.ac.cn

Abstract Safety and high efficiency are the two priorities of autonomous driving, which involves the integration of communication, sensing, and computing (ICSC). However, it is difficult to realize these priorities through the two solutions available at present, i.e., individual vehicles and networked vehicles. In this paper, enlightened by the compulsive-controlling strategies of railway transportation system, a promising solution called the autonomous driving with virtual rail (ADWVR) is proposed to improve safety and efficiency. In ADWVR, virtual rails, which are defined as moving trajectories, and the control strategies for vehicles are planned synergistically. With the support of enhanced ICSC, vehicles can be tracked and controlled along the virtual rail in real time through a cellular network. In this paper, the system architecture of ADWVR is presented, and the constitution and functions of each module are introduced. Moreover, the key technologies of ADWVR are discussed, including centralized control with a hierarchical architecture, ultra-reliable and low-latency wireless communications, and high-precision positioning. Five ADWVR implementations based on multiple positioning technologies are reviewed, where the deployment strategies and application scenarios are elaborated separately. The proposed ADWVR is a potential scheme for improving the safety and efficiency of autonomous driving and may provide guidance for future research.

Keywords autonomous driving, communication-sensing-computing integration, autonomous driving with virtual rail, centralized controlling with hierarchical architecture, ultra-reliable and low latency communications, high-precision positioning