

雷达与视频融合技术在高速公路全天候事件检测中的应用

江海天

(广东新粤交通投资有限公司, 广东 广州 510700)

摘要 高速公路交通事件自动检测是智能交通系统创建的关键部分。当前单独使用传感器技术存在明显局限, 视频监控受环境光线及天气状况的约束, 雷达探测缺少对目标细节的识别能力。这种技术瓶颈导致在雨雪雾霾恶劣天气时检测准确率大幅降低。雷达与视频融合技术凭借多种信息互补, 可以弥补单一传感器的不足, 改善复杂环境下检测的可信度。本文重点讨论这种融合技术的实现途径及其应用意义, 以期为解决高速公路全天候监控难题提供新的技术思路。

关键词 雷达技术; 视频监控; 数据融合; 交通事件检测; 高速公路

中图分类号: TN95; TN9478.6; U4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.28.013

0 引言

随着我国高速公路网络规模持续扩大, 交通流量迅速上升, 对道路交通安全管控提出了更高的要求。传统监测方法无法应对恶劣天气条件下的监控需求, 亟需采用创新技术加强全天候交通事件检测能力。雷达与视频融合技术充分发挥微波雷达强抗干扰能力和视频监控丰富语义信息的优势, 借助多层次信息融合完成优势互补, 为改进高速公路运营安全水平提供了有效的技术支撑。

1 雷达与视频融合的技术原理

雷达与视频融合技术的本质是依靠多源异构传感器的相互补充和协同处理, 构建超越单一感知维度的环境认知能力。其主要原理建立在传感器特性互补、时空同步与信息关联三大基础之上。在物理感知特性上, 雷达通过发射毫米波或者厘米波的电磁波并接收回波来探测目标, 其探测过程利用多普勒效应和飞行时间 (ToF) 原理, 可以直接得到目标的径向距离、速度以及方位角信息, 且探测性能几乎不会受到光照、雨雪、雾霾等环境条件的影响。视频监控是依靠光学成像原理, 采用 CMOS 或者 CCD 传感器接收可见光或者红外光谱信号, 从而形成包含丰富纹理、颜色、形状等语义信息的二维图像序列, 但是在恶劣天气或者低照度情况下, 感知能力就会大大下降。

为实现有效融合, 必须解决时空同步和数据关联这两个核心问题。时空同步要形成统一的坐标基准和

时间戳体系, 通过联合标定技术, 把雷达极坐标系和视频图像像素坐标系执行转换配准, 依靠硬件触发或者软件同步手段保证数据采集时空间的一致性。数据关联则是在此基础上, 借助目标跟踪算法, 如卡尔曼滤波、粒子滤波、特征匹配技术, 把雷达探测到的目标点迹同视频检测到的目标框执行一一对应, 解决“哪个雷达目标对应哪个视频目标”的关键问题。在信息融合层面, 主要采用特征级和决策级融合范式。特征级融合将雷达提取的目标运动特征 (如位置、速度、轨迹) 与视频提取的目标外观特征 (如视觉特征向量、类型置信度) 进行拼接或加权融合; 决策级融合则分别基于雷达数据和视频数据独立进行初步目标识别与事件检测, 基于 D-S 证据理论、贝叶斯推理等将两个相互独立的决策结果进行置信度的融合处理, 输出联合判定结果^[1]。

2 雷达与视频融合技术的核心优势

2.1 全天候环境适应性与感知可靠性

雷达与视频融合技术最突出的优点在于其冲破了单一传感器环境条件的局限性。微波雷达具有强大的穿透力, 即使在雨、雪、雾、霾的恶劣天气里也能稳定地进行探测, 准确得到目标所在的位置、速度以及运动轨迹的矢量信息。而视频监控可以提供丰富的纹理特征和视觉细节, 但在低照度或者恶劣天气情况下性能显著下降。结合雷达的强抗干扰性与视频的高分辨率优点, 系统能在任何环境下持续可靠地感知情况,

这种互补的效果保证了交通事件检测系统不会被光照和天气状况左右,实现全天候不间断的连续观察,极大地提高了高速公路经营的安全保障水准。

2.2 多维度信息互补与目标识别精度提升

雷达和视频传感器在信息获取层面有着天然的互补性,雷达可以给出准确的空间物理参数测量,包含目标的距离、径向速度、方位角等运动学特征。然而其角度分辨能力和目标分类能力有限,视频监控能够获取目标的视觉特征信息,包含颜色、纹理、车型等外观属性,而且可以凭借深度学习算法实现细致的目标分类和行为分析。通过信息融合,系统可以把雷达精确测量到的运动轨迹与视频识别出的目标属性执行时空联系和交叉验证,从而大幅改进目标识别的精确度和可信度。

2.3 冗余备份与系统容错能力增强

融合架构提供了重要的系统冗余与容错能力。在单个传感器发生故障或者性能下滑时,另一个传感器仍可维持基本的功能,保证系统不会彻底失效。例如:当视频系统因强光、镜头污损或夜晚照明不足等情况致使图像质量下降时,雷达系统就可以持续供应可靠的检测和追踪数据;反之,当雷达面临干扰或出现异常情况时,视频系统可通过对视觉特征的分析维持事件检测能力。这种冗余安排既加强了系统的可用性及可靠性,又凭借多源数据相互印证的方式,有效地找出并剔除掉传感器异常引发的错误信息,从而明显改进系统的整体鲁棒性和运行稳定性。

3 雷达与视频融合技术在高速公路全天候交通事件自动检测中的应用路径

3.1 基于多模态特征互补的层次化融合感知

信息融合理论中的JDL模型认为,不同抽象层次的数据处理可以实现多源信息的有效集成和互补。雷达和视频传感器在物理特性上具有天然的互补性,雷达具备精确的测距、测速能力以及强大的抗干扰性,但缺少目标的细节特征;视频具备丰富的纹理、颜色、形态等信息,但受到环境光照的影响较大。层次化融合感知采用数据级、特征级、决策级的三级融合架构,可以充分发挥各自的优势。在数据级,进行时空配准和数据关联,建立雷达点云与视频像素之间的对应关系;在特征级,提取雷达的运动特征和视频的外观特征,形成多模态特征向量;在决策级,基于D-S证据理论或者模糊推理,对目标的状态和事件类型进行联合判定^[2]。这种层层推进的处理方式,既保存了原本

的数据的完整性,又通过各种信息融合增强语义理解,最终在决策层面达成最优解,显著提升了系统在恶劣环境下的感知鲁棒性和事件识别准确率。

在具体实施上,需先形成统一的时空基准。利用标定技术创建雷达坐标系和视频图像坐标系之间的转换联系,依靠时间同步机制保证数据采集的一致性。高速公路沿线布置雷达和视频传感器时,采取同杆共址安装方法,缩减视域差别。在数据处理环节,雷达系统随时给出目标轨迹列表,视频系统凭借深度学习模型,如YOLO系列,识别车辆目标,提取外观特征。融合中心按照跟踪—关联—决策流程:用卡尔曼滤波预估目标位置,用匈牙利算法关联数据,最后依照多特征加权投票策略判定事件类型。例如:车辆异常停车检测,同时对雷达轨迹的速度突变和视频图像的静止进行监测,当两种证据都达到一定数量时就触发报警。这个路径是模块化的,既可以与现有的基础设施兼容,又可以靠软件升级实现功能加强。

3.2 引入边缘智能计算的端边云协同架构

基于边缘计算范式和Cyber-Physical System(CPS)理论,用分布式的计算架构解决海量数据实时处理的瓶颈问题。传统的集中式云处理模式难以达到交通事件检测的低延时需求,特别是在高密度交通流的情形下,雷达和视频产生的数据量极大,全部上传到云端就会造成网络堵塞和决策延迟。边缘智能计算把算力下沉至数据源头,传感器近端执行初步处理,仅把有用特征和事件信息传给云端,实现“数据—计算—决策”的高效协同。这种架构借助端(传感器)、边(边缘服务器)、云(中心平台)的三层分工,达成计算资源的合理安排,端侧负责数据采集和轻量级预处理,边侧承担核心融合算法和即时决策,云侧则执行模型训练、系统改良和宏观调控。

实际操作时,需在高速公路沿线门架布置边缘计算节点,安装具有一定算力的嵌入式设备或者微型服务器。雷达和摄像头装入轻量级算法,执行初步过滤任务,如雷达clutter抑制、视频背景建模。边缘节点收到多个传感器的数据后,运行融合检测算法,依靠优化的神经网络模型,如Mobilene-SSD开展即时分析,形成结构化的事件信息。云端平台汇集诸多边缘节点的数据,进行大规模的交通流态势分析,利用联邦学习技术不断改善边缘节点的模型^[3]。例如团雾路段检测,边缘节点可即时融合雷达的能见度反演数据和视频的对比特性,从而动态调节检测灵敏度,把预警信息本地广播至可变情报板,实现秒级响应。这

种架构明显缩减了网络带宽需求,改善了系统的实时性和可靠性,为大规模路网部署提供了经济可行的技术途径。

3.3 构建基于数字孪生的动态仿真与优化平台

该路径创新性地将数字孪生技术应用至交通事件检测领域,借助建立物理空间和虚拟空间之间的双向映射与互动,检测系统可以不断改进和验证。数字孪生体是物理实体的虚拟对应物,既有静止的道路设施模型,又有动态的交通流模型、环境模型和传感器模型,形成一个高度仿真的仿真环境。在此平台上,可以预先检验融合算法的有效性,模拟各种极端天气情况下的检测效果,用强化学习技术自动调整系统参数。数字孪生体可以和物理系统并行运作,随时将虚拟预测和真实输出做对比,通过差异分析找到系统潜在的问题,实现自我演进与持续改进。

在执行过程中,需先创建高速公路路段的高精度三维模型,包含几何构造、材料特性、环境状况等。再创建传感器数字模型,精确模仿雷达的电磁波流传特性、视频的光学成像过程。在虚拟空间里,利用交通流仿真制造各种正常的和不正常的驾驶行为,模仿不同天气情况(如雨、雾、雪、夜),并生成相应的传感器数据。融合算法在数字孪生环境中训练和检测,通过大量情形检验之后才投入实际运用。系统运作时,物理传感器数据同虚拟预测结果不断对比,一旦出现明显差异就会触动模型更新机制。例如:面对冬季路面积雪的情况,数字孪生平台可以事先对雷达波在雪地的散射特性和视频在雪盲条件下的成像质量等场景问题进行模拟预测,调整融合算法相关参数设定,然后用 OTA 方式传送给边缘侧执行。这种基于数字孪生的闭环优化机制,使系统具备持续的学习以及自动适应能力,能不断适应新的环境考验,提升系统的智能化水平和长久可靠性。

3.4 基于联邦学习的分布式隐私保护融合机制

该路径将联邦学习(Federated Learning)的人工智能范式引入多传感器融合中,有效解决了数据隐私保护和协同学习之间的矛盾问题。传统的集中式学习要将各个路段采集的原始视频和雷达数据传送到云端执行模型训练任务,这不仅存在数据泄露的风险,而且还要承受巨大的传输带宽压力^[4]。联邦学习采用“数据不动模型动”的革命性思路,只在各个边缘节点上本地训练模型,然后把模型参数加密传送到云端去汇总更新,再把优化后的全局模型发回给各个节点。这种机制既保护了各个路段的数据隐私性,又可以利

用全网的数据特性来改进模型的泛化能力、合适高速公路分段修建、分段经营的应用情况。

在具体执行时,首先需要于各个路段边缘计算节点上部署具有本地训练能力的硬件设备,每个节点凭借自身拥有的雷达和视频数据,对目标检测、特征提取等基本模型展开训练。云端服务器会定时把最新的全局融合模型发放给各个边缘节点,各节点依靠本地的数据对模型加以微调训练,训练完毕后再把模型参数加密上传到云端。云端运用安全聚合算法(如基于同态加密的加权平均算法)对来自各个节点的模型参数进行融合,产生优化后的全局模型^[5]。通过这种迭代式的分布式训练方式,系统可以不断地适应不同路段独有的环境特性(比如山区弯道、平原直道、沿海多雾路段),而核心的检测能力却得以维持不变。以车辆逆行检测为例,处于山区弯道路段的节点可能会累积更多复杂的轨迹数据,依靠联邦学习机制,其训练出的模型参数可以协助全局模型更好地识别特殊的几何路径下的异常行为,不但大大缩减了数据传输的需求,而且通过知识分享改善了整个系统检测的准确度和适应性。

4 结束语

雷达与视频融合技术凭借多源信息互补和协同处理,有效突破了单一传感器在高速公路交通监测方面的局限性。该技术不但显著改进了全天候状况下交通事件检测的精确性和可信度,而且为智慧交通系统创建提供了关键的技术支撑。随着人工智能和 5G 通信技术的深入应用,该技术将会朝着智能化、网络化的方向持续发展,为创建安全高效的高速公路运作管理系统提供有力的保证。

参考文献:

- [1] 彭怀亮,孔晨晨,胡伟超,等.雷达与视频跨模态融合技术在道路交通管理中的应用研究[J].道路交通管理,2025(06):34-37.
- [2] 王泽华,贾彦党,刘昌新,等.基于激光雷达与视频融合技术的隧道内交通事件识别方法优化研究[J].运输经理世界,2025(02):112-114.
- [3] 吴崇远.视频与雷达融合的交通目标感知技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2024.
- [4] 朱钦.毫米波雷达与视频融合的交通信息感知技术研究[D].荆州:长江大学,2024.
- [5] 孟维伟,郭丽苹,张兴宇.雷达与视频融合的交通信息感知技术研究[J].城市道桥与防洪,2022(10):242-244,27.