

模态信息融合的船舶航行环境感知与风险预警系统

0 引言

为提升航行安全主动性与科学性, 本文基于 2023 年度海南省高等学校科学研究项目(Hnky2023-43)“多模态交通警示信息个性化推荐算法研究”, 聚焦多模态信息融合技术在船舶航行场景的应用, 梳理航行环境感知与风险预警的核心理论, 明确数据级、特征级以及决策级融合的层级差异及适用场景, 构建起涵盖多源数据时空校准、关联匹配与融合推理的完整技术框架, 阐明不同融合策略在复杂海况下的感知优势与作用机制。同时, 重点突破传感器协同校准、感知不确定性量化、系统鲁棒性提升等工程化关键技术, 打破理论模型向实船应用转化的瓶颈。

1 理论基础

多模态整合是将视觉、听觉和文本等不同模态的数据进行整合, 是提升信息处理及理解能力的技术方式。不同模态数据在物理性质与信息特征方面存在差别, 融合后能够达成更全面且更精准的信息认知。该融合过程主要分为 3 个层级: 数据层融合即直接汇集不同模态的原始数据; 特征层融合是先提取各模态数据特征后再融合; 决策层融合则针对不同模态处理结果进行融合。

2 系统核心技术与实现方法

2.1 多模态数据对齐与关联技术

多模态数据对齐与关联是有效融合的前提, 其核心是解决数据一致性问题。空间配准通过传感器外参标定确定雷达、摄像头等相对船体坐标系的位置, 再通过坐标变换矩阵将多源目标位置统一到同一坐标系, 实现空间一致; 时间配准采用图片传输协议(Picture Transfer Protocol, PTP)等高精度时钟同步协议赋予数据统一时间戳, 异步数据通过卡尔曼滤波预测等插值算法对齐至同一时间轴, 以确保时间同步。时空配准后, 通过最近邻域法等数据关联方法, 计算不同传感器观测数据在位置、速度等维度的相似度, 用以判断是否来自同一物理目标, 其准确性对后续融合质量产生影响。

2.2 融合算法与风险预警机制

融合算法是从“感知”到“认知”的核心, 应结合场景选择适配方案。传统概率方法中, 卡尔曼滤波及其非线性变种(EKF 和 UKF 等)通过运动模型预测目标状态, 与观测值加权融合得到最优估计, 可融合船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)和雷达数据生成更平滑准确的轨迹, 适用于线性动态系统。智能融合方法是当前研究热点, 深度学习融合网络, 通过双流网络等结构实现异构数据到感知结果端到端的映射, 可自动提取深层特征。注意力机制能自适应评估不同模态信息的重要性, 如恶劣天气下提升雷达数据权重, 以保障系统的可靠性。风险预警机制基于融合后的全局态势图, 采取分级模式权衡预警有效性与干扰性, 提示级别专门针对没有开启 AIS 的小型渔船等存在潜在危险的对象, 警示驾驶员留意; 他船进入警戒范围且

最近会遇点(Distance to Closest Point of Approach, DCPA) / 最近会遇时间(Time to Closest Point of Approach, TCPA)超阈值时为警告级, 发出声光警示且给出避让提议, 一旦碰撞风险极高, 紧急级就会触发最高警报, 与控制系统互动实施紧急避碰方案。

3 系统实现的工程挑战与对策

1) 船舶航行对预警系统的实时性要求极高, 处理延迟一般要控制在 1 s 内, 以免错失避让机会。因此, 计算负载与实时性的平衡是首要挑战。在系统运作阶段, 采用轻量化的模型技术, 借由剪枝去除冗余参数、量化降低数据精度, 以少量牺牲模型精度为代价大幅减少计算量; 配置高性能边缘计算设施, 依靠专用计算芯片增强数据处理效能, 防止云端计算引发延迟问题; 通过提升计算流水线, 针对数据采集、预处理、融合推理等环节进行流程重造, 让各环节并行开展, 使系统响应速度达标。

2) 在复杂的海洋环境里, 各类传感器易造成测量差错, 若直接依据融合结果做决策, 可能因误差积累致使判断不准。因此, 融合结果需附带置信度, 为决策给予可靠支撑, 解决方案的核心是引入概率框架, 可运用贝叶斯滤波、证据理论等经典手段, 或采用概率深度学习模型, 达到量化感知结果的目标。假设不同传感器信息有冲突, 或部分传感器因环境干扰而出现信息缺失状况, 系统可凭借量化的不确定性指标, 择取可信度较高的信息进行融合, 防止单一传感器误差影响系统性能。

3) 系统鲁棒性及故障诊断能力的构建也重要的部分, 船舶航行环境复杂多变, 会出现摄像头被海浪遮挡、雷达信号受干扰等状况, 系统要具备降级运行能力, 以保障基本运行功能, 可通过构建冗余架构, 为关键传感器配置多台设备做备份, 同步构建线上故障诊断模块, 实时监测各传感器的数据质量和运行情形。当监测到传感器数据异常或丢失时, 系统会自动调整融合策略, 转向借助剩余正常传感器的工作模式。同时, 透过人机交互界面向驾驶员反馈系统性能下降的情况, 确保驾驶员结合实际情形做出恰当判断。

4 结束语

本文对多模态信息融合的船舶航行环境感知与风险预警系统展开研究, 通过构建层级化信息融合架构、突破多源数据协同处理技术、建立分级预警机制并破解工程化实施难题, 实现航行环境感知从局部零散到全域完整、风险预警从被动响应到主动预判的跨越。未来, 伴随高分辨率传感器技术革新、跨模态融合算法将持续优化及船岸一体化数据交互体系不断完善, 该系统有望在态势感知实时化、风险评估精细化、应急处置智能化方向取得更大进展, 为全链条智能航运安全保障体系构建基础。

焦萍萍

(三亚学院, 海南三亚 572000)