

多传感器信息融合在智能装备控制中的应用

罗子轩

广东石油化工学院, 广东 茂名 525000

[摘要] 智能装备在动态环境中运行, 需要连续获取自身状态、作业对象与周边空间信息。单一传感器容易受到量程、噪声、遮挡及环境变化影响。多传感器信息融合通过时间同步、空间配准、状态估计和决策综合, 提高感知完整性与控制稳定性。文章分析数据层、特征层和决策层融合方法, 讨论其在移动装备定位、路径控制、目标识别和协同作业中的应用, 并提出分层处理、可信度评价、故障隔离及全周期验证路径, 为智能装备融合控制系统设计提供参考。

[关键词] 多传感器; 信息融合; 智能装备; 状态估计; 控制系统

DOI: 10.64635/ja.2026.1437

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Application of Multi-Sensor Information Fusion in Intelligent Equipment Control

Luo Zixuan

Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming, Guangdong 525000, China

Abstract: Intelligent equipment operating in dynamic environments needs to continuously acquire information about its own state, operation objects, and surrounding space. A single sensor is easily affected by range limits, noise, occlusion, and environmental changes. Multi-sensor information fusion improves perception completeness and control stability through time synchronization, spatial registration, state estimation, and integrated decision-making. This paper analyzes data-level, feature-level, and decision-level fusion methods, discusses their applications in mobile equipment positioning, path control, target recognition, and collaborative operations, and proposes paths involving hierarchical processing, credibility evaluation, fault isolation, and full-cycle verification, providing reference for the design of fusion control systems for intelligent equipment.

Keywords: multi-sensor; information fusion; intelligent equipment; state estimation; control system

引言

工业机器人、无人运输装备、智能工程机械和自动化生产设备正在由固定程序控制转向环境感知驱动的自主控制。装备运行状态不再只由编码器或限位开关描述, 还需要综合视觉图像、激光点云、惯性数据、力觉信号、卫星定位和设备工况参数。不同传感器在量测对象、采样频率、空间范围和误差特征方面存在差异。单一信息源出现遮挡、漂移或短时失效时, 控制系统可能获得不完整甚至错误的状态信息, 影响轨迹规划、姿态调节与安全制动。

多传感器信息融合是对不同来源的观测数据进行关联、校准、综合和推断的处理过程。早期研究已将其应用于机器人、自动导航和复杂工业过程控制, 并形成数据层、特征层与决策层等基本融合层次^[1]。近年来, 卡尔曼滤波、图优化、深度学习和注意力机制持续扩展融合能力, 智能装备能够依据更完整的状态表征调整控制策略。融合系统仍受到异步采样、坐标偏差、信息冲突、计算时延及传感器退化等因素制约, 技术设计需要将感知精度与控

制实时性纳入统一框架。

1 多传感器信息融合的技术基础

1.1 多源感知信息的互补关系

智能装备采用的传感器可分为本体状态感知和外部环境感知两类。本体传感器包括编码器、惯性测量单元、电流传感器、温度传感器和力矩传感器, 用于描述位置、速度、姿态、负载与健康状态。外部传感器包括相机、激光雷达、毫米波雷达、超声传感器和卫星定位接收机, 用于获取目标类别、障碍距离、空间结构及绝对坐标。

各类传感器的优势具有互补性。相机能够提供纹理、颜色与目标语义, 但深度测量易受光照和遮挡影响。激光雷达直接获取空间距离和几何轮廓, 雨雾、粉尘及反射特性会降低点云质量。惯性测量单元具有高采样率, 短时运动估计连续, 积分误差会随时间累积。卫星定位提供绝对坐标, 在厂房内部、隧道或高楼遮挡区域可能失去稳定信号。融合处理利用不同传感器的有效区间弥补局部缺陷, 为控制器提供连续、完整且带有可信度描述的状态量。

1.2 信息融合的层次与方法

数据层融合直接处理原始量测,能够保留较多细节,适用于采样频率接近、坐标关系明确的同类传感器。特征层融合先从图像、点云或振动信号中提取边缘、目标、几何结构和频域特征,再通过拼接、加权或注意力计算形成联合表示。决策层融合对多个检测器或分类器的结果进行组合,系统结构灵活,也便于隔离局部故障。

状态估计主要采用加权估计、卡尔曼滤波、粒子滤波、贝叶斯推断和图优化。卡尔曼滤波适合处理近似线性且噪声特征可描述的动态系统。扩展卡尔曼滤波和无迹卡尔曼滤波可处理不同程度的非线性。粒子滤波能够表示非高斯分布,计算量随粒子数量增加。张康皓等将多传感器状态估计归纳为集中式、分散式和分布式方法,并指出分布式结构在系统扩展与局部故障处理方面具有优势^[2]。深度学习方法擅长提取跨模态特征,训练数据覆盖不足时仍可能出现泛化误差,工程系统通常需要保留基于物理模型的约束。

2 面向智能装备控制的融合架构

2.1 感知数据采集与时空对齐

融合控制的基础是统一数据基准。时间对齐需要处理传感器采样频率差异、通信延迟和时间戳漂移。高频惯性数据可通过插值匹配低频视觉帧,延迟较大的量测则需利用状态预测回推对应时刻。空间对齐涉及传感器外参标定、坐标转换和安装误差补偿。移动装备通常建立传感器坐标系、机体坐标系、局部地图坐标系与全局坐标系,通过刚体变换统一位置和姿态表达。

数据预处理包括异常值剔除、噪声滤波、单位统一和质量标记。传感器数据不能仅按时间顺序送入融合算法,还需记录量测方差、有效范围和工作状态。雨雾条件下视觉与激光雷达置信度下降,惯性与毫米波信息的权重可相应提高。质量标记为动态加权和故障隔离提供依据。

2.2 状态估计与环境表征

状态估计把多源观测转换为控制器所需的统一变量。移动装备关注位置、速度、航向角和角速度,机械臂关注关节角、末端位姿、接触力与负载,生产设备还需估计温度、振动和磨损状态。融合模型由运动方程预测下一时刻状态,再利用传感器观测修正预测偏差。观测残差超出合理范围时,系统降低异常信息来源权重或启动隔离机制。

环境表征将分散量测组织为栅格地图、点云地

图、目标列表或语义地图。几何信息服务于避障和距离控制,语义信息服务于目标选择与作业规划,动态目标轨迹服务于碰撞预测。多传感器融合不只增加数据量,更重要的作用是建立可供控制任务直接调用的环境模型。

2.3 融合结果向控制量的传递

融合结果通过状态接口传递给规划器与控制器。规划器依据装备位姿、障碍分布和任务目标生成路径或动作序列,控制器再计算转向、驱动、制动及关节力矩。感知更新频率与控制周期需要匹配。低频语义识别结果适合修正任务层决策,高频惯性和编码器数据适合支撑姿态与速度闭环。

可信度信息需要随状态量一并传递。定位协方差增大时,规划器可降低速度并扩大安全距离。目标识别置信度不足时,作业机构保持等待或补充观测。传感器失效时,系统根据剩余信息源切换降级控制模式。该传递机制把融合误差显式纳入控制策略,避免控制器将不稳定估计值当作确定状态。

3 多传感器信息融合的典型应用

3.1 移动装备定位与路径控制

无人运输车、巡检机器人和智能工程机械通常融合惯性测量单元、轮速编码器、激光雷达、相机与卫星定位数据。轮速和惯性数据提供连续运动信息,激光或视觉里程计修正短期漂移,卫星定位及地图特征提供全局约束。高强等指出,多传感器融合的同步定位与地图构建能够利用异构传感器互补信息,提高移动机器人在特征稀少、光照变化和快速运动条件下的建图与定位能力^[4]。

融合位姿直接影响路径跟踪误差。位置估计稳定时,控制器能够按照规划轨迹调整转角和速度。定位不确定度升高时,装备降低行驶速度并重新观测环境。坡地、湿滑路面或轮胎打滑会破坏轮速里程计假设,此时惯性、视觉及激光观测能够协同识别运动偏差。地下空间或厂房内部缺少卫星信号,局部地图匹配承担绝对位置修正,形成适应不同作业区域的组合定位方式。

3.2 作业装备识别与协同控制

机械臂抓取、智能装配和工程机械作业需要同时识别目标位置、表面姿态、接触力和周边障碍。视觉传感器定位作业对象,深度或激光信息补充三维几何,力觉与触觉信号判断接触状态。装备接近目标时采用视觉引导,发生接触后提高力觉反馈权重,可减少刚性位置控制引发的碰撞风险。

多装备协同场景还需要融合不同平台的局部感知结果。王秉路等在公开仿真数据集 OPV2V 上融合激光雷达与相机信息,比较了无融合、前融合、后融合和注意力融合方法^[3]。部分公开结果见表 1。

表 1 不同融合方式在 OPV2V 数据集上的三维目标检测结果

融合方式	默认场景 AP@0.5/%	默认场景 AP@0.7/%	卡尔弗 城场景 AP@0.5/%	卡尔弗 城场景 AP@0.7/%
无融合	67.9	60.2	55.7	47.1
前融合	89.1	80.0	82.9	69.6
后融合	85.8	78.1	79.9	66.8
注意力融合方案	91.4	85.2	88.6	78.8

注:数据引自文献^[3]。AP 表示平均精度,0.5 和 0.7 为交并比阈值。结果来自公开仿真数据集,用于说明该实验条件下的融合效果,不直接代表各类智能装备的生产性能。

表 1 中,无融合方案在卡尔弗城场景的 AP@0.7 为 47.1%,注意力融合方案达到 78.8%,提高 31.7 个百分点。多平台、多模态信息能够扩展观测范围并减少遮挡影响。融合收益也依赖定位精度、通信带宽和坐标一致性,协同控制系统需要限制过期信息和低可信数据参与决策。

4 工程应用中的主要问题

4.1 异构数据误差与信息冲突

传感器误差包含随机噪声、固定偏差、温度漂移和安装偏差。多源数据经过坐标转换后,微小标定误差可能在远距离目标上形成明显位置偏差。两个传感器给出冲突结果时,简单平均会掩盖异常。融合系统需要根据量测残差、历史稳定性和环境条件动态计算可信度,并设置冲突检测阈值。长期运行中的机械振动和结构变形还会改变外参,标定参数需要定期检查或在线修正。

4.2 实时计算与通信约束

高分辨率图像和密集点云占用较多计算与传输资源。集中处理便于统一建模,数据汇聚会增加通信压力和单点故障风险。分布式处理在传感器端提取特征,仅传输关键状态或目标信息,能够减少带宽占用,局部结果的时间一致性和相关性处理更加复杂。控制系统需根据任务周期确定融合深度。毫秒级姿态控制优先采用轻量状态估计,目标识别和任务规划可在较长

周期内完成。

4.3 安全可靠性与模型适应性

融合算法不能把多个不可靠信息源组合成表面稳定的错误结果。系统需要检测传感器卡死、数据重复、通信中断和突变漂移,并建立单源失效、组合失效及极端环境下的降级策略。学习型融合模型还可能受到训练场景限制,背景、光照或设备型号变化会降低识别效果。安全相关控制保留物理边界、速度限制和独立制动通道,学习模型输出经过规则校验后再参与动作生成。

5 多传感器融合控制的优化路径

5.1 分层融合与软硬件协同

智能装备可采用“边缘预处理—状态融合—任务决策”的分层架构。传感器端完成滤波、压缩和质量标记,实时控制器完成位姿与工况估计,上位计算单元承担目标识别、地图构建和任务规划。不同层级通过统一时间戳、坐标定义和状态接口交换信息。关键控制链采用确定性通信与实时计算平台,计算量较大的学习模型部署在具有加速能力的边缘设备。算法配置与硬件资源共同设计,可避免高精度模型超过控制周期。

融合方法选择需要结合装备任务。固定工位机械臂可突出视觉与力觉融合,移动机器人侧重定位、建图和障碍感知,工程机械还需纳入液压压力、载荷和结构振动信息。数据层、特征层和决策层可以组合应用,不宜追求单一融合形式覆盖全部任务。

5.2 全周期验证与运行维护

验证工作包括传感器单体测试、标定测试、融合算法回放、半实物仿真和实装试验。评价指标除定位误差和识别准确率外,还包括端到端时延、信息更新率、故障检出率、降级成功率及控制稳定性。测试场景需要覆盖遮挡、弱光、雨雾、振动、通信延迟和单源失效。公开数据集可用于算法初步比较,实装数据用于确认设备结构、作业环境与控制周期下的实际效果。

运行维护阶段持续记录传感器质量、残差分布、融合权重和控制结果。参数漂移超过阈值时启动重新标定,模型性能下降时补充对应场景样本。软件版本、标定文件和模型参数统一管理,升级前完成历史数据回放与安全测试。通过运行记录分析误差来源,可逐步优化传感器布置、融合策略和控制边界。

6 结语

多传感器信息融合连接了智能装备的环境感知、

状态认知与闭环控制。相机、激光雷达、惯性测量单元、编码器和力觉传感器各自提供不同维度的观测，经过时间同步、空间配准、状态估计与可信度评价后，可形成控制任务所需的统一状态。公开实验表明，合理融合能够提高复杂场景下的目标检测性能，相关收益受到标定精度、数据质量、通信条件和算法结构共同影响。工程应用需要按照控制周期分配融合任务，保留故障隔离、降级运行和独立安全保护机制。融合系统的发展重点将由单纯增加传感器数量转向信息质量评估、模型约束和软硬件协同，在可验证的安全边界内提升智能装备的自主控制能力。

【参考文献】

- [1] 王耀南, 李树涛. 多传感器信息融合及其应用综述 [J]. 控制与决策, 2001, 16(5): 518-522.
- [2] 张康皓, 董希旺, 于江龙, 等. 多传感器融合状态估计方法综述 [J]. 导航定位与授时, 2022, 9(5): 28-37.
- [3] 王秉路, 靳杨, 张磊, 等. 基于多传感器融合的协同感知方法 [J]. 雷达学报(中英文), 2024, 13(1): 87-96.
- [4] 高强, 陆科帆, 吉月辉, 等. 多传感器融合 SLAM 研究综述 [J]. 现代雷达, 2024, 46(8): 29-39.