

多模态传感器融合在工业机器人位姿修正中的应用

唐宇翔

(西南科技大学信息与控制工程学院, 四川 绵阳 621000)

摘要 工业机器人在复杂作业环境中常面临位姿误差积累问题, 影响其操作精度和系统稳定性。本文研究了多模态传感器系统在位姿修正中的构成原理, 分析了多源数据融合对位姿精度和处理速度与环境适应性的具体影响, 提出了融合策略在传感器部署、算法构建与控制流程设计中的应用方案, 探讨了融合技术在工业机器人高精度定位中的发展潜力, 以期为保障智能制造中的机器人精密控制与稳定运行提供有益参考。

关键词 多模态传感器融合; 工业机器人; 位姿修正; 高精度定位

中图分类号: TP242; TP21

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.006

0 引言

工业机器人是广泛用于工业领域的多关节机械手或多自由度的机器装置, 具有一定的自动性, 可依靠自身的动力能源和控制能力实现各种工业加工制造功能。工业机器人被广泛应用于电子、物流、化工等各个工业领域之中。2025年1月17日, 国家统计局数据显示, 2024年工业机器人产品产量增长14.2%。工业机器人在动态作业环境中常因视觉遮挡和惯性漂移等问题导致位姿信息不准确, 限制了其在高精度场景下的应用可靠性。多模态传感器融合以多源异构信息协同建模为核心, 具备数据互补和误差修正与鲁棒增强优势, 逐渐成为解决位姿偏差的重要手段。本文围绕系统构成、性能影响与实际部署策略展开研究, 可为提升位姿修正的实时性与稳定性提供参考。

1 多模态传感器系统构成与原理

工业机器人多模态传感器系统由视觉传感器和惯性测量单元(IMU)以及激光雷达等多种感知模块组成, 视觉传感器可获取二维或三维图像信息用于特征点提取与目标识别, IMU提供角速度与线性加速度用于姿态估计与运动补偿, 激光雷达实现高精度距离测量与空间轮廓重建^[1]。各传感器采集的数据在时间同步与空间对齐后进入融合模块进行信息整合, 运用扩展卡尔曼滤波和因子图优化或深度学习方法构建统一的位姿估计模型, 在协同处理框架下, 不同模态信息按照观测质量与时序特征进行加权组合, 构建鲁棒的状态更新通路以实现连续、稳定的位姿输出以支撑闭环控制。

2 多模态融合在位姿修正中的应用价值

多模态融合在位姿修正中的应用基于不同传感器在空间和时间以及物理量维度的互补性, 借助构建状态估计模型整合视觉图像和惯性数据与激光测距信息, 系统在传感数据同步的前提下对每一类信号设定动态置信度, 并结合非线性滤波或图优化算法进行状态解算。系统在位姿输出过程中可以根据局部观测冗余自动调整各通道的参与程度, 以此提升估计精度并保持对外部干扰的鲁棒响应能力。在遮挡和光照变化或接触不确定性等复杂环境下, 融合结构可持续输出稳定的姿态解, 使机器人末端保持精确定位并完成高动态任务。

3 多模态融合对机器人性能的影响

3.1 位姿修正精度优化

多模态融合结构在位姿修正中利用多源冗余观测增强姿态解算精度, 视觉模块提供全局空间参考信息构建稠密特征图, IMU模块输出高频角速度和线加速度数据用于短时轨迹插值, 力觉模块反馈末端接触方向与压力状态辅助误差约束建模。状态估计算法运用非线性优化方式引入残差项约束各传感器间的数据一致性, 对低置信度输入设定自适应调权机制避免误差放大^[2]。系统在空间解算中引入相对变换匹配策略对历史轨迹进行滑动窗口复投影处理, 提升局部估计的稳定性与全局参考的连贯性。测试过程覆盖多个典型工况, 包括平面轨迹跟踪、三维空间移动与重复定位操作, 不同传感结构在相同任务下的误差表现如表1所示。

多模态融合系统在位姿精度测试中展现出远低于单一传感器结构的误差水平, 误差均值稳定控制在2

毫米左右。平面路径误差表现出较低波动性，说明融合策略在静态轨迹跟踪中具备高一致性。在动态路径变化条件下，多模态系统对位姿扰动的响应更加收敛，三维误差标准差显著低于其他方案，末端重复定位测试中融合系统表现出持续性位置控制能力，无明显偏移累积。

表 1 多模态融合与单一传感器在位姿误差指标下的比较 (单位: mm)

测试项目	单目视觉系统	IMU 系统	力传感系统	多模态融合系统
平面路径误差均值	4.6	7.2	5.9	1.8
三维路径误差标准差	5.1	6.8	5.2	2
末端重复定位最大偏差	6.3	8.1	6.7	2.5
多工况平均误差	5.5	7.4	6.1	2.1

3.2 系统处理速度提升

多模态融合系统在提高处理效率方面主要依赖于结构级并行计算与模型压缩策略的组合设计，边缘计算节点将部分图像与惯性数据预处理模块部署于本地控制器中，以此减少数据传输延迟并降低中央计算单元压力，神经网络结构借助通道剪枝与参数共享机制构建轻量级卷积核集成模块，替代传统图优化过程中的高维稀疏求解来有效缩短运算周期。实验配置下在 500 Hz 采样频率条件下融合模块完成一次完整数据解算平均耗时 4.8 毫秒，相较于基准滤波方案减少约 2.3 毫秒的响应延迟。在系统机器人连续运动状态下可维持不间断的状态解算，处理周期与控制周期保持匹配关系以避免状态估计滞后影响轨迹控制。

3.3 极端环境下的稳定性增强

工业环境中常见的强光干扰和油污遮挡以及高频振动等工况对单一类型传感器构成显著挑战，视觉系统在强反光条件下图像质量下降，IMU 在振动频率变化时产生姿态漂移。多模态融合结构在感知层引入状态异常检测机制识别信源质量波动，当任一通道信噪比低于设定阈值时系统自动降低其参与权重，并加强对剩余通道数据的滤波和时间窗重采样处理^[3]。在遮挡测试中视觉模块失效期间，系统维持 IMU 和力觉状态更新路径，使机器人可以保持末端姿态的连续控制。在高频扰动测试下 IMU 与视觉耦合可借助速度和位移融合模型进行姿态反演补偿，以此消除累计误差，融合

系统在复杂装配与抓取任务模拟中被遮挡超过 30% 的作业区域内依旧维持姿态稳定，无明显抖动或漂移现象。系统在不同异常情形下均具备自适应稳定性调节能力，以保证状态估计的连续性与位姿输出的平滑性。

4 位姿修正中的应用策略

4.1 传感器部署方案设计

传感器的部署策略需要依据机器人任务场景的操作特性和工作空间几何结构及目标物体表面属性进行系统规划，视觉传感器在末端执行器附近安装时需考虑工作距离和焦平面覆盖范围与遮挡频率的协同影响，若作业环境存在复杂背景纹理或多反光干扰，应选用具备强光抑制或红外感知功能的结构光或深度相机，并调整其姿态角度，使其主视轴与典型作业面的法向方向存在可控夹角以形成有效特征投影^[4]。IMU 需紧贴末端刚性框架固定，安装方向应严格对齐工具坐标系主轴方向，以此避免陀螺数据在传递至运动控制器时出现旋转耦合误差。激光雷达部署在非工作面附近，借助倾角设置与扫描频率匹配形成区域覆盖互补，以减少视觉盲区对空间点云构建的影响。多传感器视野重叠区域应保证在关键路径与操作工位存在足够冗余，来避免关键姿态估计节点出现单源依赖问题。系统标定阶段运用基于外参联合优化的方法，在标定板或编码靶标辅助下获取各模块在统一参考坐标系下的精确位置与方向关系，以此保障后续融合算法的数据输入具备统一的空间逻辑一致性。工业机器人多模态传感器布局示意图如图 1 所示。

4.2 融合算法构建方法

多模态传感器融合算法的构建核心在于状态估计模型的构造与观测模型的精度描述能力。扩展卡尔曼滤波结构依赖系统状态与观测模型的可导性要求，适用于传感器误差分布满足高斯条件且动态变化平稳的定位任务，在 IMU 与视觉组合构型中可用于短周期内线性化近似更新^[5]。粒子滤波结构在状态非线性与多模态分布条件下维持较强的样本表达能力，适合于遮挡频繁或非高频传感输入的场景，但对计算资源的要求较高，需结合采样重置机制，避免粒子退化。图优化方法以因子图构建残差结构，适用于融合历史信息、冗余路径和环路闭合条件下的全局姿态估计，在 SLAM 与轨迹重建任务中具有较高稳定性与误差一致性。深度学习侧重于端到端映射建模，运用卷积网络提取图像特征并与 IMU 序列融合，在多工况训练集覆盖下能形成对光照变化、动态遮挡的高鲁棒性响应。网络结构常集成 LSTM 或 Transformer 模块处理时间序列特性，

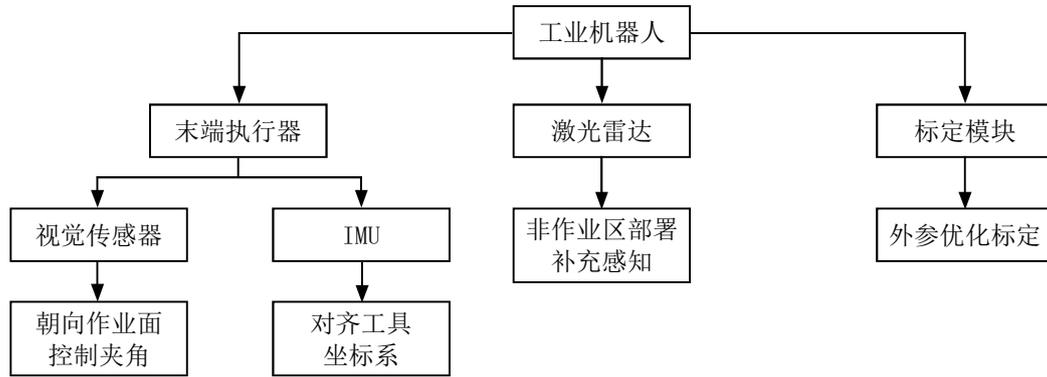


图1 工业机器人多模态传感器布局示意图

实现多步预测与当前状态回归的耦合输出。融合算法构建中还需考虑传感器更新频率差异、数据延迟与同步偏差，在时间对齐机制中引入滑动窗口处理与事件触发更新策略可有效提升状态解算效率与响应精度。

4.3 控制流程设计规范

位姿修正控制流程的设计应基于感知、决策、执行三个子系统的实时耦合关系展开，数据流从多模态感知层向状态解算模块输入，经融合算法处理后生成当前精确位姿估计，并作为反馈信号输入控制器以修正预设轨迹或动作规划路径。控制器内部构建预测—校正结构，前向模型基于运动学或动力学参数计算目标位姿与控制指令之间的误差偏移，感知层输出的融合状态作为校正量对执行信号进行实时调整。位置控制运用闭环PID或模型预测控制架构，角度控制则需结合四元数或欧拉角误差映射模型进行插补求解，保障机器人末端操作的连续性与稳定性。系统流程中引入状态评价模块实时监测各通道置信度水平，对突发遮挡、信号漂移或传感器故障进行异常检测，并触发权重重分配或数据重采样机制以维持控制稳定性。任务执行阶段控制系统需具备动态调整功能，根据不同作业节点加载不同的参数集与融合策略模板，满足从粗定位到精接触的不同精度与反馈频率要求。流程集成过程中所有模块需统一通信接口标准与时序协议，保障传感与控制模块间的数据一致性与低延迟响应，最终构建稳定、可扩展的控制系统架构。

5 多模态融合技术在位姿修正中的发展前景

多模态融合技术在位姿修正中的未来发展将围绕高集成度感知模组和低延迟融合计算架构与自适应控制闭环系统展开，传感器在结构上将运用多功能集成设计，集视觉、惯性与触觉于一体的微型单元将借助共享时钟与总线接口降低系统复杂度。融合算法将在结构上由静态滤波模型向具备序列理解能力的神经网络

转变，引入注意力机制提升动态场景中的特征提取效率。控制系统将构建状态反馈驱动的自校准机制，融合模块根据作业环境变化动态调整观测模型与控制参数，在不同材料、光照或负载条件下维持位姿估计与执行输出的一致性与稳定性。

6 结束语

多模态传感器融合技术构建了以视觉和惯性以及力觉为核心的感知系统，在状态估计中引入非线性优化与动态权重分配机制，以此实现位姿修正误差的有效抑制。融合算法具备较强的实时处理能力，在高频动态场景下保持控制闭环稳定，传感器部署遵循任务导向结构配置，并结合控制流程构建了稳定高效的数据反馈通道。系统在复杂工况下表现出良好的抗干扰能力与持续输出能力，具备工程级部署的可行性。

参考文献:

- [1] 毕盛,杨礼铭,董敏,等.语言视觉激光多模态融合的机器人导航方法[J/OL].小型微型计算机系统,1-12[2025-01-21].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=RNPVX-4KY7gLz0mLn7qjGaOh2LwsAzzq7VRF0jyBxIRwGkovTvo3BWd-h3Yvtx4mTkLKFeXbRRKEzvXJAPj1n6maWi1gU7gd688hwmu5AMvfms4nAglraoyXY0YXz-1Ji7ckZYM_AWskEvWQ4t6ivwyXij9FUaR8YcayZfj3usOX2r40mdQGNw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [2] 宋冬蕾.基于多模态传感器数据的心理健康识别算法研究[D].长春:吉林大学,2024.
- [3] 赵荣飞.多模态传感器数据融合高压开关健康状态监测[J].中国新技术新产品,2024(19):22-24.
- [4] 孙列,董富江.基于传感信号的工业机器人抛光加工位姿控制[J].传感技术学报,2024,37(08):1369-1376.
- [5] 崔荣钺.六自由度工业机器人运动学标定方法研究[D].济南:济南大学,2024.