

基于激光-雷达-红外多模态融合抗干扰动态感知架构技术研究

金第均 宁亚锋 王紫君 高小红
陕西飞机工业有限责任公司 陕西 汉中 723000

摘要：本文探讨了基于激光-雷达-红外多模态融合抗干扰动态感知架构技术在飞机领域的应用。分析了多模态数据融合的技术难点，包括数据关联与不确定性处理、实时性要求、数据格式与带宽差异、复杂飞行环境适应性等。提出了抗干扰动态感知架构，包括多模态数据预处理、融合策略选择、动态感知与决策机制等关键环节。通过仿真实验验证了该架构在提升飞机感知精度、抗干扰能力和决策效率方面的有效性，为飞机在复杂环境下的安全飞行提供了技术支持。

关键词：激光-雷达-红外；多模态融合；抗干扰；动态感知架构

1 引言

随着航空技术的不断发展，飞机在军事、民用等领域的应用日益广泛。然而，飞机在飞行过程中面临着复杂的飞行环境，如电磁干扰、恶劣天气、诱饵弹干扰等，这些因素对飞机的感知系统提出了极高的要求。传统的单一传感器感知系统已难以满足飞机在复杂环境下的飞行需求，因此，基于多模态融合抗干扰动态感知架构技术的研究显得尤为重要。本文旨在探讨基于激光-雷达-红外多模态融合抗干扰动态感知架构技术在飞机领域的应用，以提升飞机的感知精度、抗干扰能力和决策效率。

2 多模态数据融合的技术难点

2.1 数据关联与不确定性处理

多传感器数据存在时空差异、测量噪声及信息冲突，导致数据关联的二义性问题。例如，来自激光、雷达、红外等传感器的数据需在时间和空间上对齐，但传感器的采样频率、精度和误差特性不同，易引入融合偏差。此外，环境动态变化（如快速移动障碍物）进一步加剧不确定性，需通过概率模型（如卡尔曼滤波）或深度学习算法优化关联策略。

2.2 实时性要求

航电系统对实时性要求极高，但融合算法（如扩展卡尔曼滤波、深度学习模型）计算复杂度高^[1]。例如，一些深度多模态融合模型需多层神经网络处理高维数据，对算力需求显著增加。如何在有限硬件资源下实现高效计算（如GPU加速、分布式处理）是关键挑战。

2.3 数据格式与带宽差异

不同传感器（如激光雷达、雷达、红外）的数据格式、带宽和可靠性差异大。例如，激光雷达成本高且易受环境干扰，红外传感器对光照敏感，需通过冗余设计

和自适应权重分配提升系统鲁棒性。同时，部分传感器故障时需快速切换备用数据源，避免系统失效。

2.4 复杂飞行环境适应性

复杂飞行环境（如城市峡谷、电磁干扰）对融合模型的泛化能力提出更高要求。需通过在线标定（如基于KL散度的自适应修正模型）和动态参数调整（如实时误差补偿）应对环境变化。

3 基于激光-雷达-红外多模态融合抗干扰动态感知架构

3.1 多模态数据预处理

3.1.1 异构数据对齐

需处理激光、雷达、红外传感器在时间、空间、精度和采样率上的差异。设计同步机制，如硬件时钟同步、软件插值对齐等，确保多模态数据在时间和空间上的对齐。例如，对于不同采样率的传感器数据，可以通过插值算法将其转换到统一的采样率下，以便后续处理。

3.1.2 数据预处理

（1）噪声抑制：采用卡尔曼滤波等方法对传感器数据进行噪声抑制，提高数据质量。（2）特征提取：针对不同类型的传感器数据，采用不同的特征提取方法。如对于激光点云数据，可以采用点云分割等方法提取目标特征；对于红外图像数据，可以采用边缘检测等方法提取目标轮廓特征。（3）数据标准化：对提取的特征进行归一化、降维等处理，以便后续融合算法能够更好地处理数据。

3.2 融合策略选择

3.2.1 融合层级选择

（1）数据级融合

数据级融合是最底层的融合方式，它直接对原始数据进行处理，如激光点云与红外图像的像素级融合。这

种融合方式能够最大程度地保留原始信息,因为所有的细节数据都被用于分析和处理。然而,数据级融合的计算量极大,因为需要处理的数据量非常庞大,尤其是在高分辨率传感器的情况下^[2]。此外,由于数据处理的实时性要求高,这种融合方式通常适用于对实时性要求极高且计算资源充足的场景。在实际应用中,数据级融合可能需要借助高性能计算单元(如GPU或FPGA)来实现低延迟的数据处理。

(2) 特征级融合

特征级融合是在提取了传感器数据的关键特征之后进行的融合。例如,从激光点云中提取几何特征,从红外图像中提取热特征,然后将这些特征进行关联与优化。这种融合方式能够在保留一定原始信息的同时,显著降低计算复杂度,因为特征提取过程已经对数据进行了降维和抽象。特征级融合适用于需要平衡实时性和精度的场景。通过选择合适的特征提取算法(如SIFT、HOG等),可以进一步提高融合效果。

(3) 决策级融合

决策级融合是在各个传感器模块已经生成了独立的决策或检测结果之后进行的融合。例如,激光、雷达、红外传感器分别对目标进行检测,然后将这些检测结果进行综合,生成最终的导航指令或目标识别结果。决策级融合具有高度的容错性,因为即使某个传感器的检测结果出现错误,其他传感器的结果仍然可以提供正确的信息。这种融合方式特别适用于复杂环境下的决策任务。

3.2.2 混合架构

在实际应用中,单一的融合层级可能无法满足所有场景的需求。因此,采用混合架构,动态选择融合层级,成为了一种有效的解决方案。例如,在飞机遭遇突发干扰时,为了快速响应,可以优先采用数据级融合来快速更新系统状态;而在正常飞行过程中,为了提高感知精度,可以采用特征级或决策级融合。这种混合架构能够充分利用不同融合层级的优势,提高系统的整体性能。

3.2.3 模型选择

结合深度学习与传统方法的优势,可以构建出更加高效和准确的融合模型。深度学习模型(如Transformer、图神经网络)在处理高维复杂数据方面具有显著优势。它们能够自动学习数据中的深层次特征,无需人工设计特征提取器。例如,在激光点云和红外图像的特征提取中,深度学习模型可以捕捉到更加细微和复杂的模式。然而,深度学习模型通常计算量大,且可解释性较差。传统方法(如贝叶斯网络、D-S证据理论)则具有计算效率高、可解释性强等优点。它们通常基于概率论或统计学原理,能够给

出明确的决策依据。在特征融合和决策阶段,采用传统方法可以有效地整合来自不同传感器的信息,并生成可靠的决策结果。因此,在实际应用中,可以采用深度学习模型对激光点云和红外图像进行特征提取,然后利用传统方法进行特征融合和决策。

3.3 动态感知与决策机制

3.3.1 动态权重调整

基于置信度或环境条件动态分配传感器权重。例如,在恶劣天气下,红外传感器的权重可以适当提高,因为红外传感器对光照不敏感,能够在一定程度上穿透云雾等障碍物;而在晴朗天气下,激光和雷达传感器的权重可以适当提高,因为它们能够提供精确的距离和速度信息。可以通过实时监测传感器的性能和环境条件,动态调整权重分配策略,以提高系统的感知精度和鲁棒性。

3.3.2 在线误差补偿

如在飞机飞行过程中,由于飞行姿态变化、气流干扰等因素,传感器的测量误差可能会发生变化。通过自适应滤波和泰勒级数展开等方法对采样误差进行矫正,提升带宽和精度^[3]。例如,可以建立传感器的误差模型,实时监测误差变化,并在线调整误差补偿参数。

3.3.3 故障检测与恢复

设计冗余链路和异常处理逻辑(如传感器断联检测),确保部分传感器失效时系统仍能稳定运行。当某个传感器发生故障时,系统能够自动切换到备用传感器或采用其他融合策略继续工作。例如,可以采用多传感器互为备份的策略,如GPS失效时,可以依赖视觉/惯性导航系统继续提供导航信息。

3.3.4 抗干扰能力

对抗环境干扰(如电磁干扰、诱饵弹干扰)的鲁棒算法(如对抗训练)。通过模拟各种干扰场景,对融合算法进行训练,提高算法在干扰环境下的鲁棒性。例如,可以采用深度学习中的对抗训练方法,将干扰信号作为对抗样本加入到训练数据中,使融合算法能够学习到如何识别和抵御干扰信号。

3.4 高精度时间同步与空间标定

3.4.1 高精度时间同步

需亚毫秒级同步(如采用PTP协议),动态环境下的时钟漂移补偿。确保多模态数据在时间上的精确对齐,避免由于时间不同步导致的融合误差。例如,在飞机飞行过程中,由于飞行速度较快,微小的时间差异可能导致较大的位置误差。因此,需要采用高精度的时间同步技术来确保多模态数据的时间一致性。

3.4.2 空间标定

多传感器坐标系的动态校准（如飞行器振动导致的位移误差）。由于飞机在飞行过程中会受到各种力的作用，导致传感器之间的相对位置发生变化。因此，需要定期对传感器进行空间标定，确保多模态数据在空间上的精确对齐。

4 仿真实验与结果分析

4.1 实验设计

4.1.1 实验环境搭建

构建包含激光、雷达、红外传感器的飞机感知系统仿真平台。模拟不同的飞行场景，如晴朗天气、恶劣天气（模拟雾霾天气，能见度设定为50米）、电磁干扰环境（干扰信号强度设定为-60dBm到-40dBm）、诱饵弹干扰环境（设置5个诱饵弹目标，其运动轨迹与真实目标相似）。在仿真平台中设置多个目标，包括3个真实目标和5个干扰目标（诱饵弹），真实目标以200m/s的速度做匀速直线运动，诱饵弹以180-220m/s的速度做近似匀速直线运动。

4.1.2 实验参数设置

激光传感器：采样频率为10Hz，测距精度为 $\pm 0.1\text{m}$ ，角度分辨率为 0.1° 。

雷达传感器：采样频率为5Hz，测距精度为 $\pm 0.5\text{m}$ ，速度分辨率为 0.1m/s 。

红外传感器：采样频率为20Hz，温度分辨率为 0.01°C ，空间分辨率为 0.1° 。

融合算法参数：数据级融合时，数据对齐误差控制在 $\pm 0.05\text{s}$ ；特征级融合时，特征提取维度为50维；决策级融合时，各传感器权重初始值均设为0.33（在动态调整中根据环境条件变化）。

4.2 实验结果与分析

4.2.1 目标识别与跟踪精度

(1) 晴朗天气下

单一激光传感器对真实目标的识别准确率为90%，跟踪误差平均值为0.3m。

单一雷达传感器对真实目标的识别准确率为85%，跟踪误差平均值为0.5m。

单一红外传感器对真实目标的识别准确率为80%，跟踪误差平均值为0.8m。

多模态融合架构对真实目标的识别准确率达到98%，跟踪误差平均值降低至0.1m。相比单一传感器，融合架构在识别准确率和跟踪精度上都有显著提升。

(2) 恶劣天气下

单一激光传感器由于雾霾影响，对真实目标的识别准确率下降到60%，跟踪误差平均值增大到1.2m。

单一雷达传感器识别准确率为70%，跟踪误差平均值

为1.0m。

单一红外传感器识别准确率为75%，跟踪误差平均值为0.9m。

多模态融合架构通过红外传感器对光照不敏感的特性，结合激光和雷达的信息，识别准确率达到92%，跟踪误差平均值控制在0.3m。这表明融合架构在恶劣天气下能够有效提高目标识别与跟踪精度。

4.2.2 抗干扰能力

(1) 电磁干扰环境下

单一雷达传感器在干扰信号强度为-60dBm时，目标识别准确率下降到50%，跟踪丢失率达到30%。

多模态融合架构通过红外和激光传感器的信息互补，在干扰信号强度为-60dBm时，目标识别准确率为85%，跟踪丢失率仅为5%。

(2) 诱饵弹干扰环境下

单一传感器容易受到诱饵弹的干扰，如单一激光传感器对真实目标的误判率为40%。

多模态融合架构通过综合分析激光、雷达和红外传感器的信息，利用不同传感器对目标特征的不同响应，对真实目标的误判率降低到10%。

4.2.3 实时性与计算效率

(1) 数据级融合：计算时间为50ms，能够满足紧急情况下对实时性的要求，但计算资源占用较高，CPU占用率达到70%。(2) 特征级融合：计算时间为80ms，在保证一定精度的同时，计算资源占用相对较低，CPU占用率为50%。(3) 决策级融合：计算时间为30ms，实时性最好，但精度相对较低（在复杂干扰环境下）。在资源充足且对精度要求高的场景下，通过优化决策算法，也能达到较好的精度，CPU占用率为40%。

结语：基于激光-雷达-红外多模态融合抗干扰动态感知架构技术在飞机领域具有显著的应用优势。通过多模态数据预处理、融合策略选择、动态感知与决策机制等关键环节的设计，该架构能够有效提高飞机的感知精度、抗干扰能力和决策效率。仿真实验结果表明，该架构在不同飞行场景下均表现出良好的性能，为飞机在复杂环境下的安全飞行提供了技术支持。

参考文献

- [1]李飞. 雷达信号载频精确估计的一种方法. 舰船电子对抗, 2019, 29(2): 28-64
- [2]邓渝忠. 正弦波频率估计的修正Rife算法. 数据采集与处理, 2019, 21(4): 473—477
- [3]秦渝. 快速高精度正弦波频率估计综合算法. 电子学报, 2019, (6): 126---128