

多维感知与智能决策 从单一视觉盲区到多传感器时 空孪生

汇报人：陈柏彤

时间：2026/05/13

- 核心引用文库：

- 《In-situ monitoring of a laser metal deposition (LMD) process: comparison of MWIR, SWIR and high-speed NIR thermography》 Simon J. Altenburg, Anne StraÙe, Andrey Gumenyuk & Christiane Maierhofer
- 《Multisensor fusion-based digital twin for localized quality prediction in robotic laser-directed energy deposition》 Lequn Chen a,b, Guijun Bi c, Xiling Yao d,* , Chaolin Tan a, Jinlong Su a, Nicholas Poh Huat Ng b , Youxiang Chew a , Kui Liu d , Seung Ki Moon b,*

极端环境挑战与监测 Pipeline

- **物理挑战：**

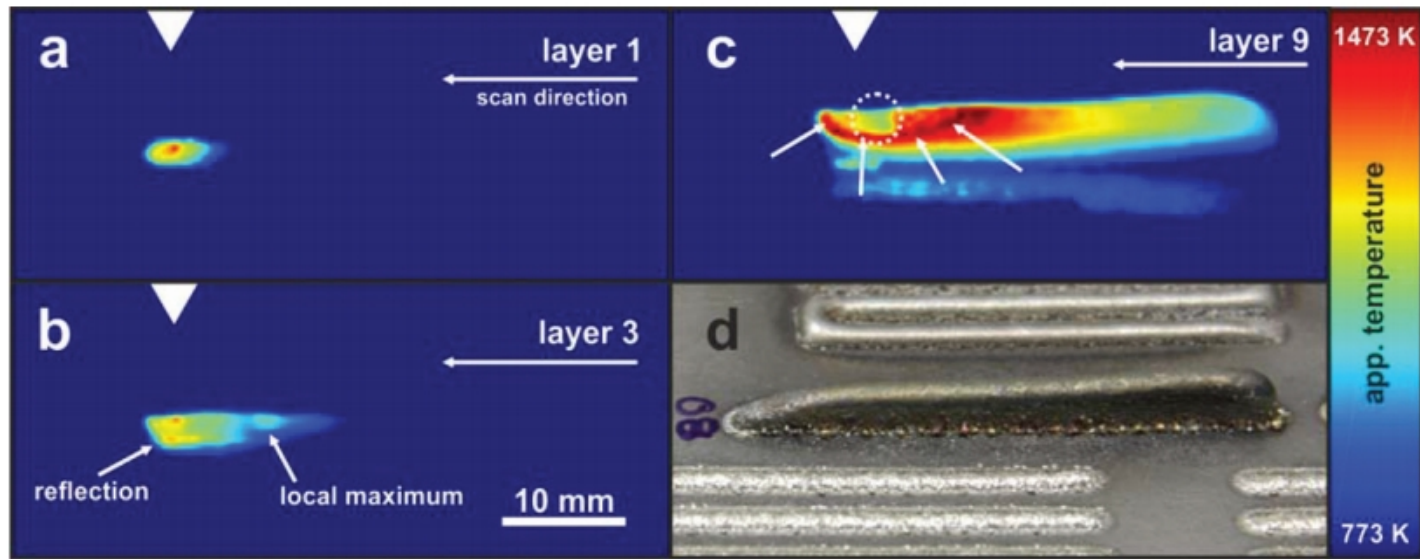
- 激光成形过程伴随着强烈的激光-材料相互作用，包括材料蒸发、工艺羽流以及飞溅。熔池在快速加热与冷却下的动态演变直接决定了微观组织特征与宏观缺陷（如锁孔气孔、热裂纹）的生成。

- **工业痛点**

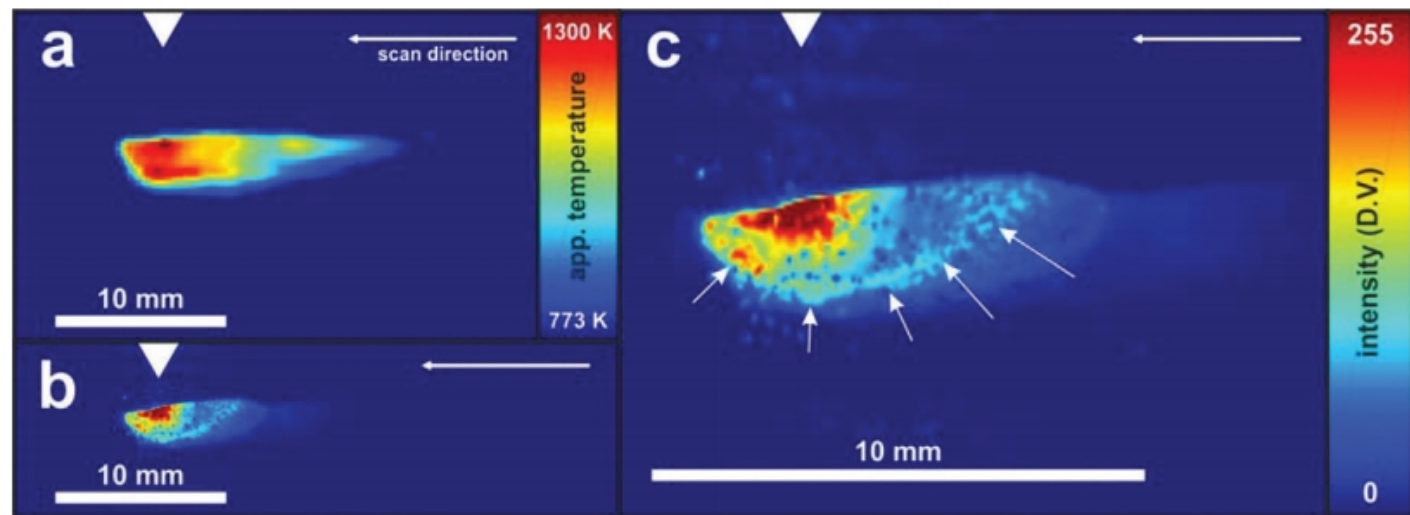
- 单模态传感无法捕获复杂熔池行为；
- 现有模型缺乏“位置特异性 (Location-specific)” 的质量预测能力

传统单一监测的物理盲区

- 可见光(VIS)/近红外(NIR)的局限：
 - 具备高空间与时间分辨率，但温度动态范围极窄。VIS 仅能捕捉约1300 K-2000K 的高温白炽区，完全丢失了熔池凝固后的关键温度梯度与冷却尾迹。
- 中波红外 (MWIR) 的发射率陷阱：
 - 发射率 (Emissivity) 陷阱：在液态熔池区域，由于金属熔化导致发射率骤降，MWIR 甚至会错误地测出一个完全违背物理常识的虚假“冷斑 (Cold Spot)”。
 - 环境伪影：MWIR 极易捕捉到基板和已成形结构的强烈红外反射伪影



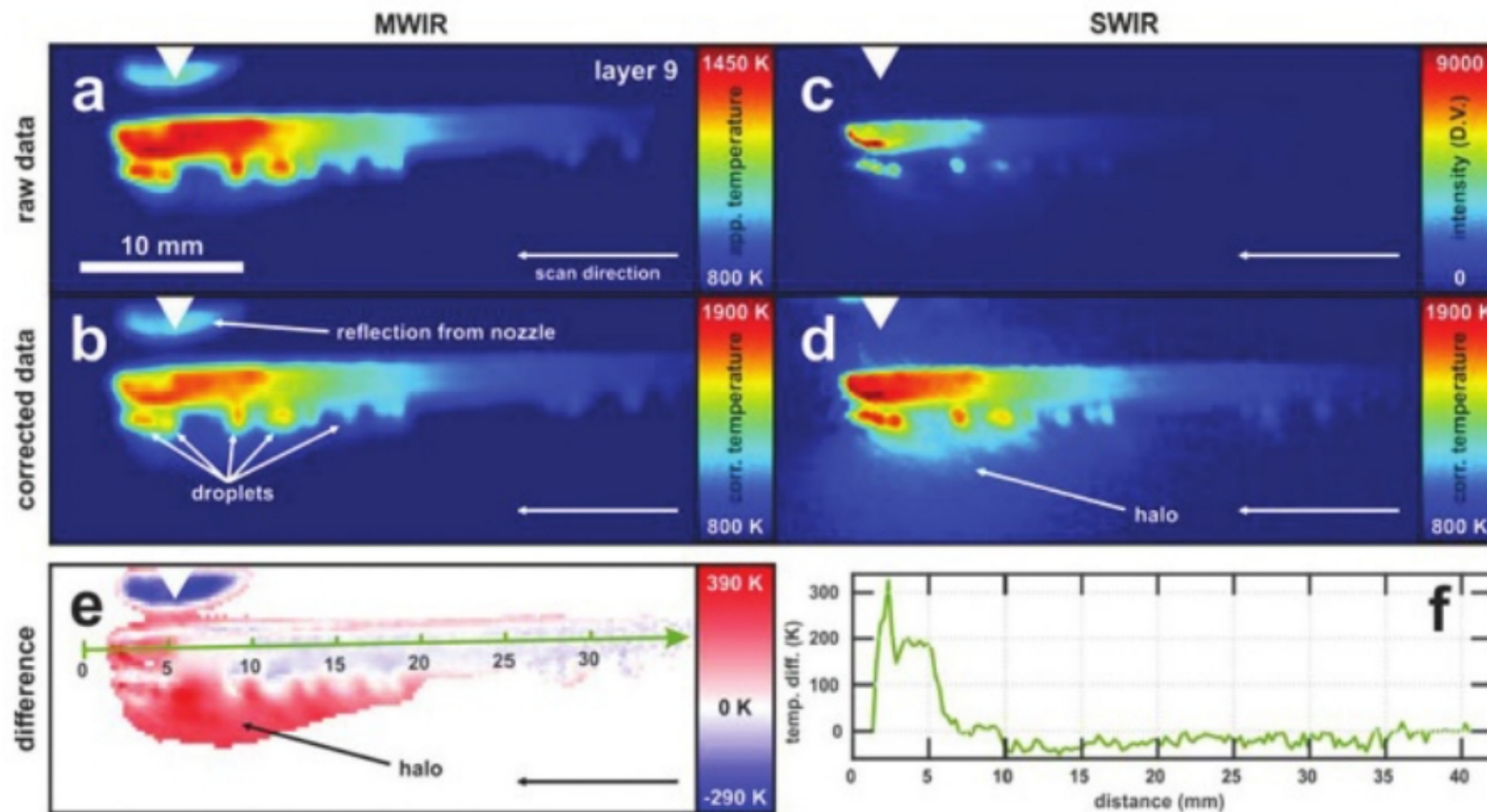
- 上图：MWIR构筑第九层时，由于金属熔化导致发射率骤降出现虚假“冷斑”



- 下图：(a):用MWIR相机记录；(b)(c):用带近红外滤光片的VIS摄像机记录
 - 相较于MWIR, VIS丢失了熔池凝固后的关键温度梯度与冷却尾迹

SWIR（短波红外）的物理级降噪

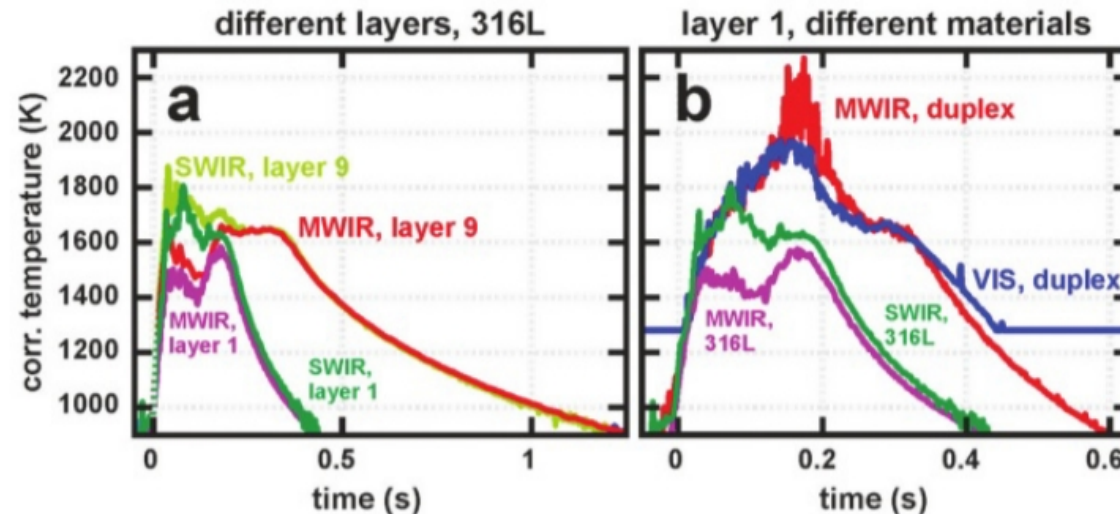
- 完美跨越相变发射率陷阱：
 - SWIR 的波段特性使其在液态金属区域不存在 MWIR 那种因发射率骤降导致的虚假冷斑，能够提供更加合理的温度场分布
- 宽动态范围测温：
 - 测温动态范围与 MWIR 相似，能够完整覆盖材料的熔化、凝固和冷却全过程
- 工程部署的绝对优势：
 - 相比于体积庞大、成本高昂且往往需要制冷的 MWIR 相机，SWIR 相机体积小、成本更低，显著降低了集成到拥挤激光设备中的工程难度



- a和c表示原始数据， b和d表示校正后的温度值。
- e: d和b之间的差异图像，限于两个相机都显示800K至1900K范围内的值的区域。主要差异是熔池和结构下方的光晕中SWIR数据的校正温度较高。

熔池热历程的精准量化

- **数据升维：**前端从“捕获图像”升级为“捕获温度冷却曲线”。引入 SWIR 后，捕获的不仅是图像，而是材料随时间演变的温度冷却曲线。
- **热累积追踪：**
 - 精确捕获到随沉积层数增加，系统在 1400K 的冷却速率从 4700 K/s 剧烈恶化至 1350 K/s，为预测热裂纹提供了直接热力学先验



异构硬件的多源数据流转架构

- **多传感器矩阵：**

- 集成同轴 CCD（形貌）、SWIR（热场）、麦克风（声学飞溅）

- **底层数据流转：**

- 通过 ROS (Robot Operating System) 独立节点处理，利用 PlotJuggler 实现 44.1kHz 声学、30Hz 图像与热像的高通量实时可视化
 - 算法在独立的节点中并行执行（例如调用 OpenCV 库提取熔池几何轮廓、提取声学 MFCC 特征），最后利用 PlotJuggler 工具实现 30 Hz 的实时多模态特征同步可视化

双击

双击

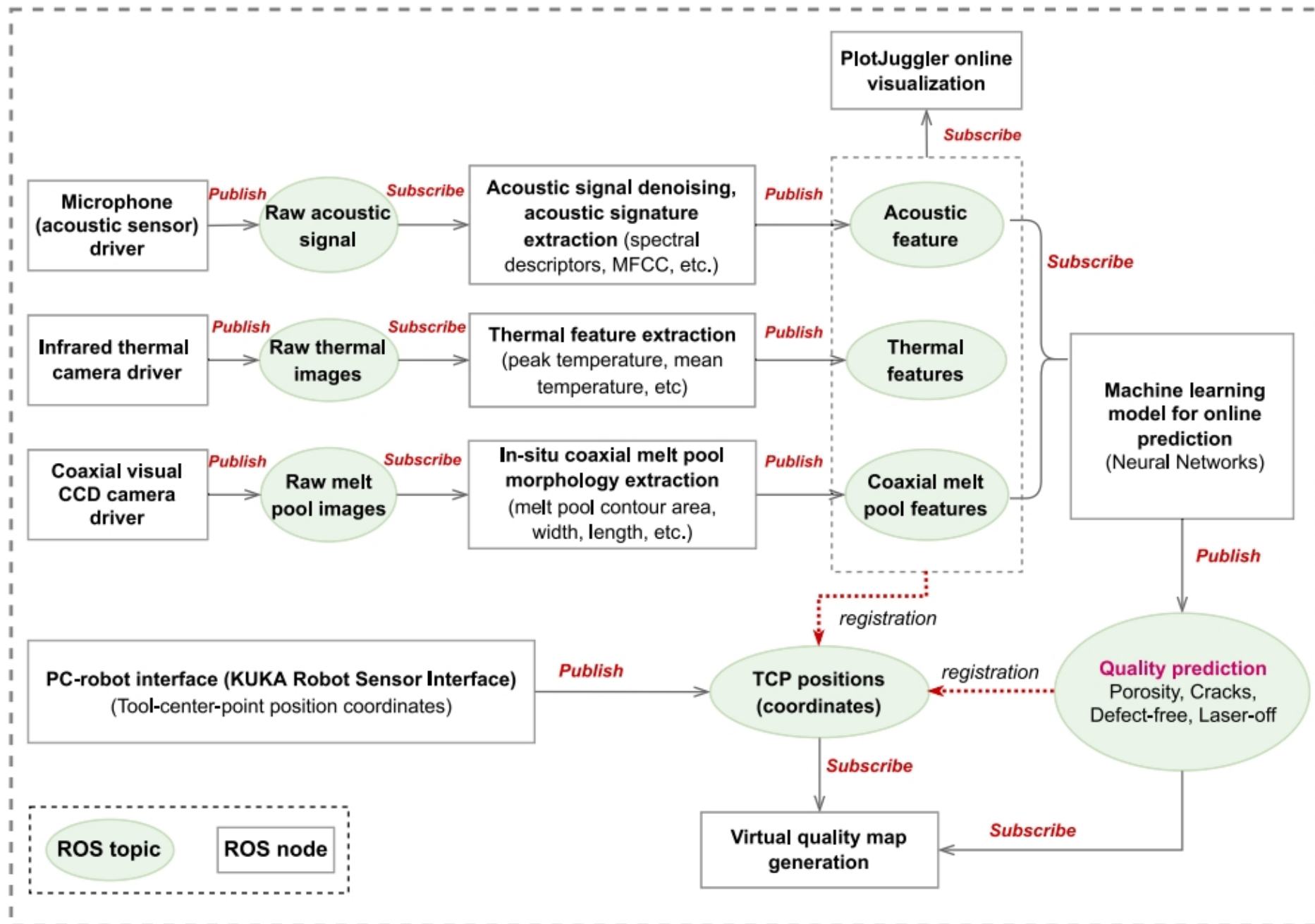


Fig. 5. ROS-based software architecture for multisensor in-situ monitoring, feature extraction, spatiotemporal feature registration, and defect prediction.

多传感器融合数字孪生（MFDT）框架

- **单一模态的感知局限：**单一视觉相机无法获取温度灵敏度，单一红外易受发射率影响，而单一声学又极易受车间环境噪声干扰，无法全面反映复杂的熔池行为
- **MFDT 核心架构创新：**构建了一个整合“同轴 CCD（视觉）+ 侧轴 SWIR（热场）+ 麦克风（声学）”的异构传感矩阵。
- **数字孪生映射逻辑：**不仅仅是收集数据，而是将提取的多维特征与真实的机器人工具中心点运动数据进行时空同步，在虚拟空间中构建能够进行“位置特异性”质量预测的三维数字孪生体

双击

双击

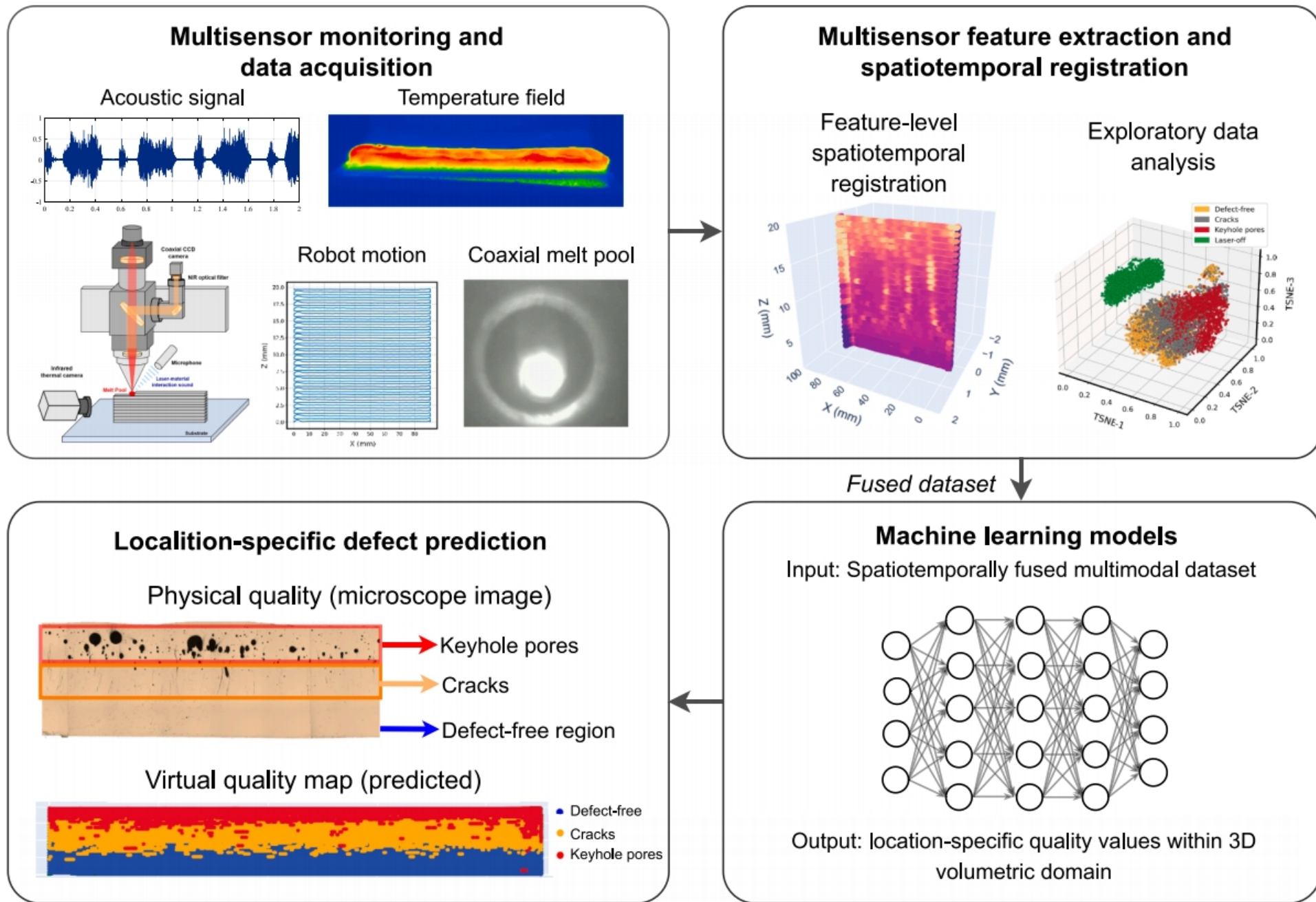


Fig. 1. The proposed multisensor fusion-based digital twin (MFDT) framework for location-dependent defect prediction in robotic L-DED.

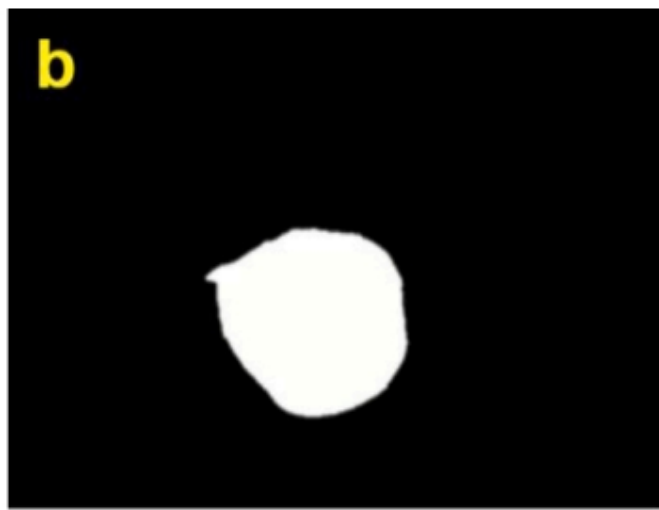
后端解算：视-声特征的数学提取

-

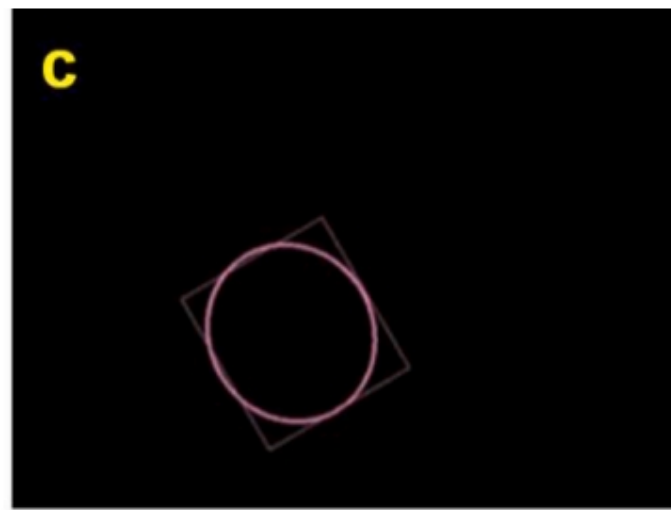




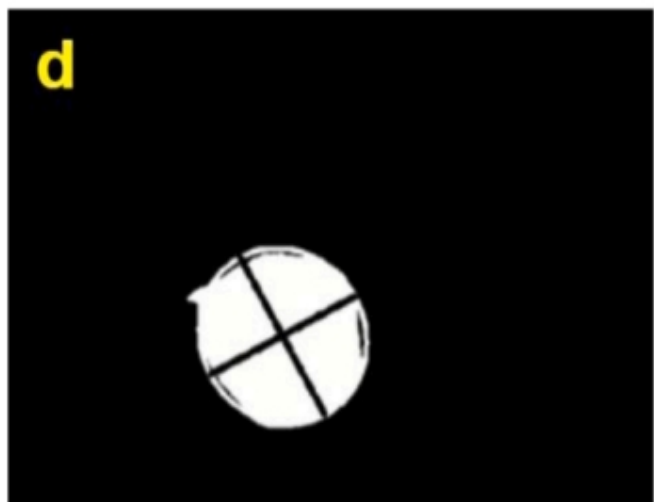
Raw melt pool image



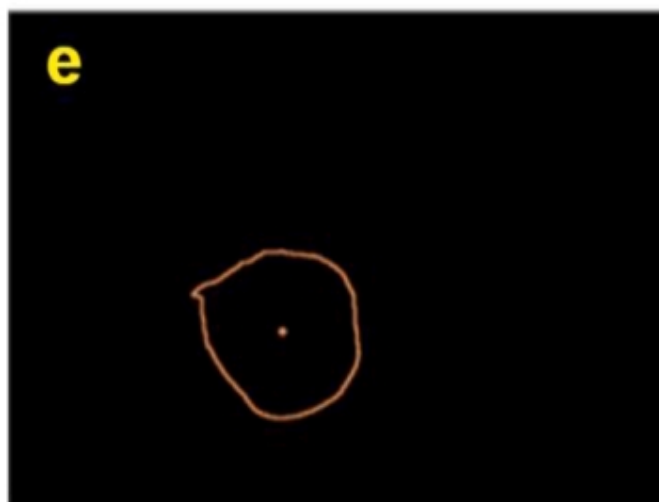
Binarized



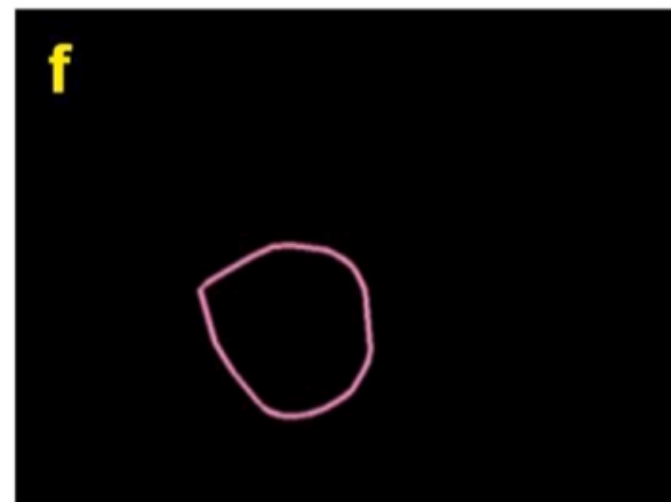
Ellipse and rectangle fitting



Length and width



Moment of area



Convex hull

Fig. 7. Coaxial melt pool image processing and geometric feature extraction.

跨模态分析（EDA）与数据降维

- **强物理耦合：**

- 斯皮尔曼相关性证明，当熔池失稳增宽时，低频声学（MFCC0/1）强正相关（ >0.7 ），中频声学（MFCC2/3）强负相关（ <-0.7 ）

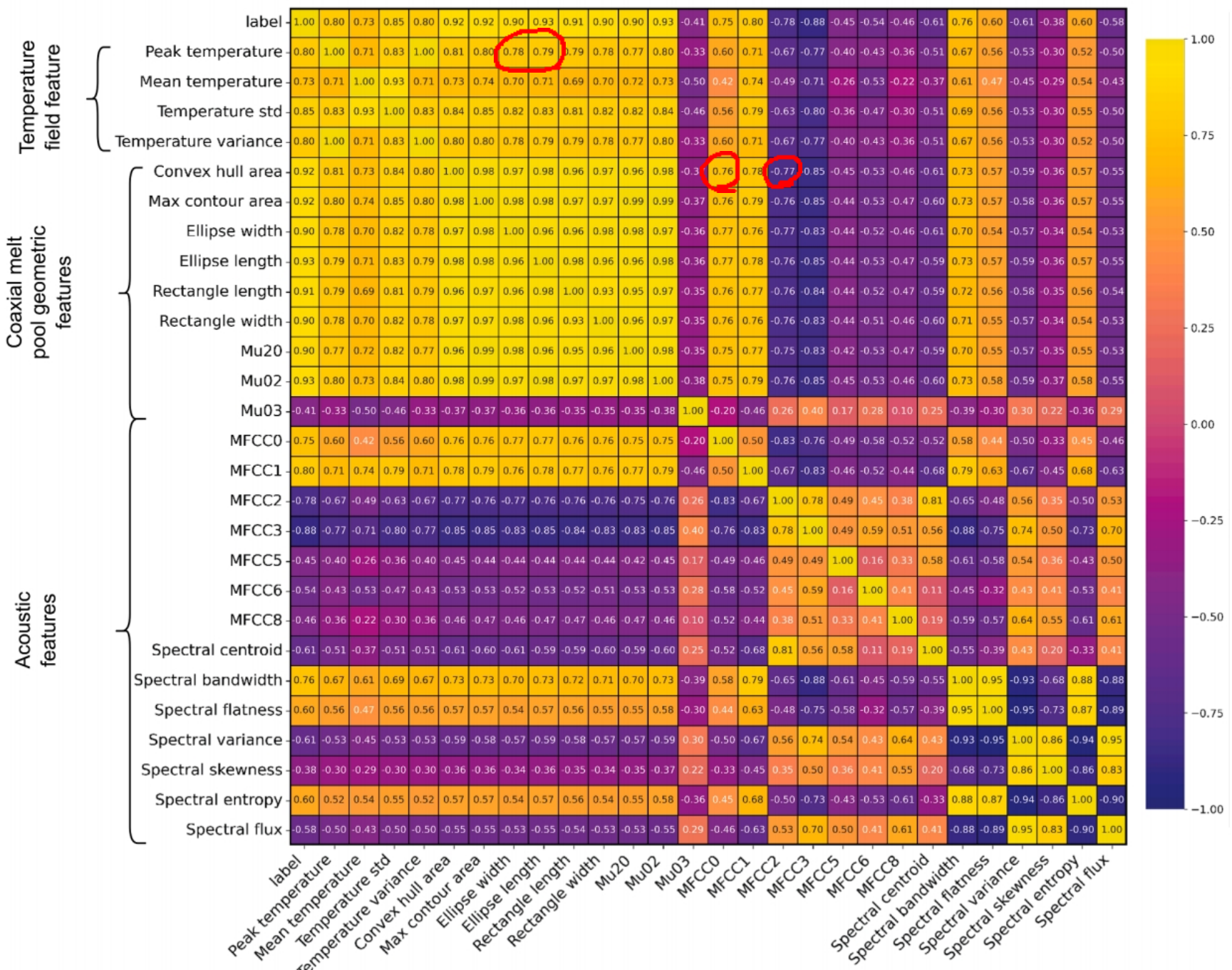
- **降维分类启示：**

- LDA/t-SNE 可视化表明，裂纹信号与正常信号呈现高度非线性重叠，必须依赖高级机器学习（ML）模型

Multisensor feature correlation heatmap

双击此

双击此



异构数据的时空注册与对齐

- **工程化痛点：**

- **频率错配：**声学信号采样率高达 44100 Hz，视觉和热成像为 30 Hz，而机器人位置坐标（TCP）更新频率为 250 Hz。如何将不同维度的特征在时间轴上拼合是一大难题。

- **ROS 近似时间同步机制：**

- 采用 ROS 消息过滤器中的 Approximate Time Synchronizer 算法。在设定的 **33ms 预测窗口**内，以最新消息为基准，对低频图像和高频音频提取的特征进行强制时间戳对齐
- **容差分析：**尽管同步过程存在微小的延迟（<30 ms），导致预测缺陷位置有极小偏移（<1 mm），但对于区域性的质量切除与修复指导而言，该精度已完全满足工业应用需求

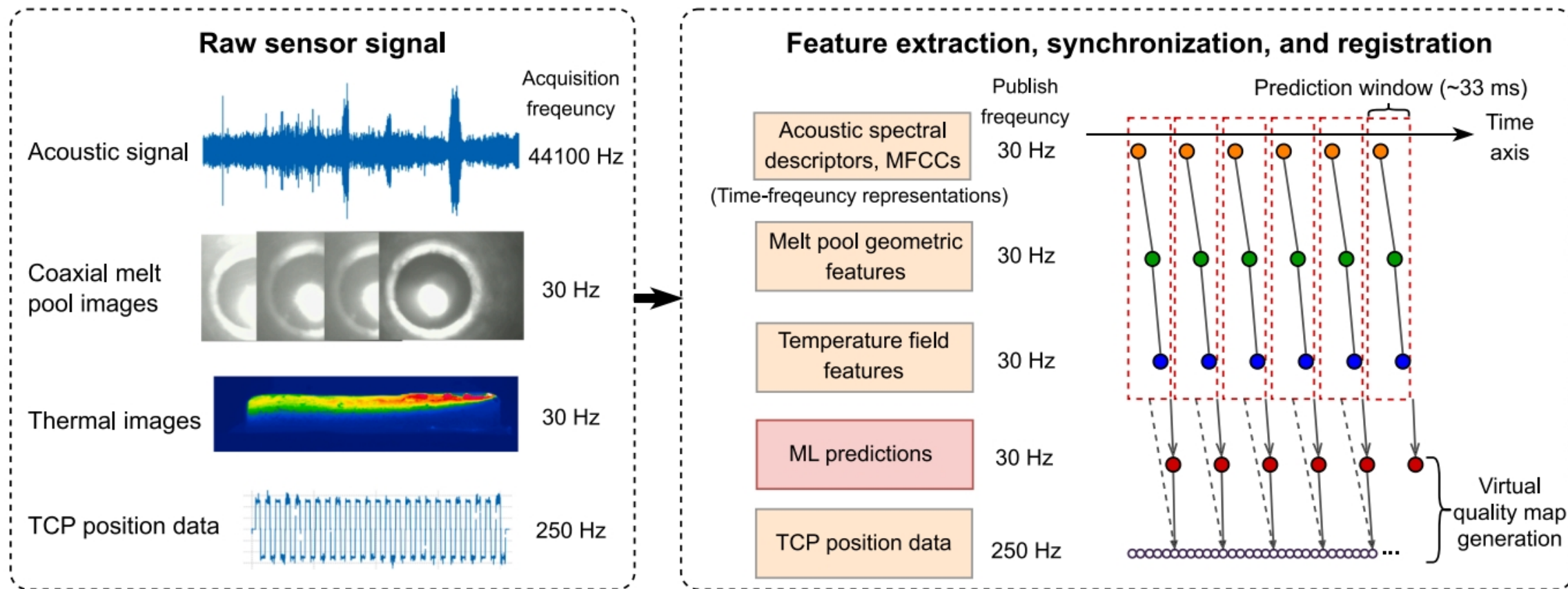


Fig. 11. Illustration of synchronization and registration between multisensor features, ML predictions and TCP positions.

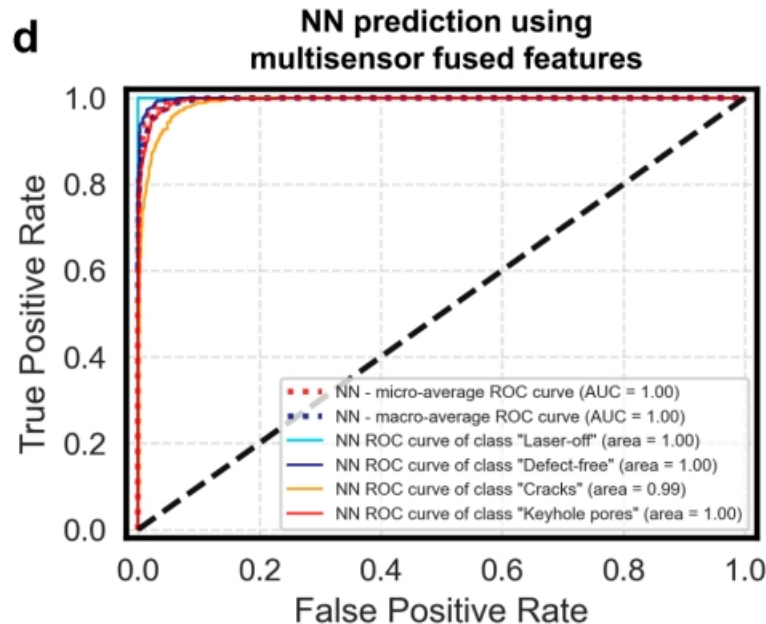
神经网络（NN）的多维碾压优势

- **量化性能：**

- 经十折交叉验证，基于多模态数据集的 NN 模型达到 **95.6%** 最高整体准确率。

- **分离度测试：**

- ROC-AUC 分数高达 **99%**，彻底碾压单一传感器（如视觉预测裂纹 AUC 仅 0.93）。



双丰此外添加标题

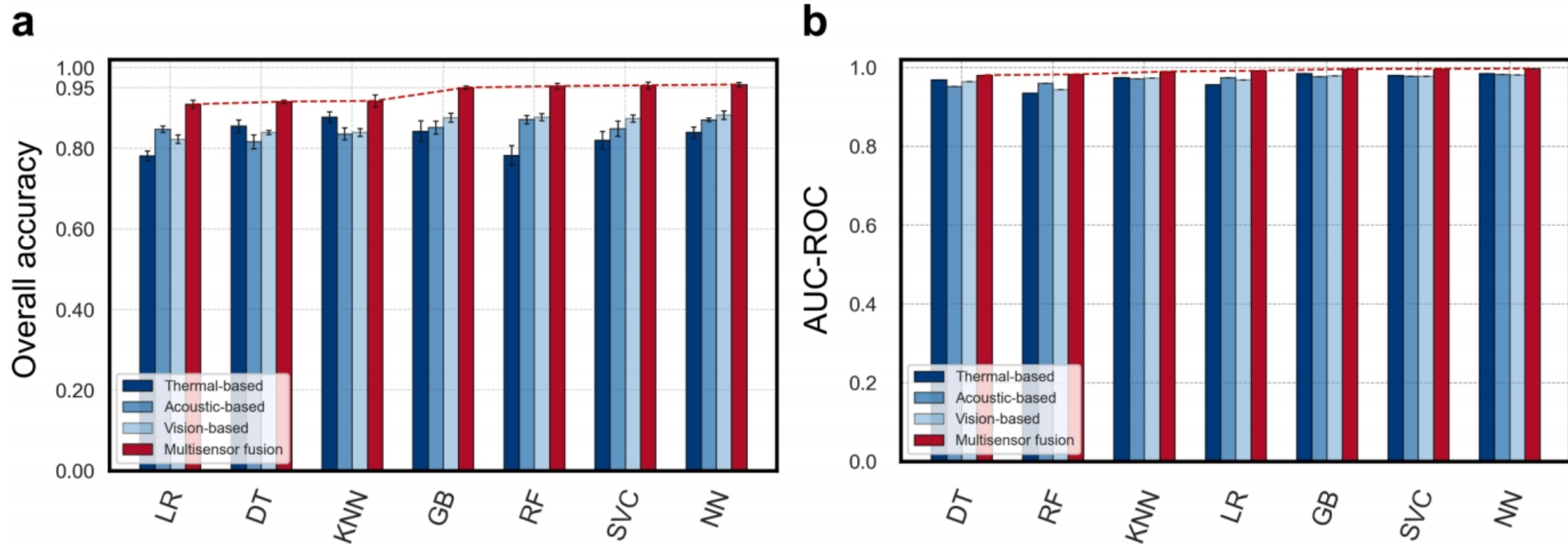


Fig. 15. Performance evaluation for multisensor fusion-based defect prediction in L-DED. (a) The overall test accuracy of seven supervised ML classifiers trained using single sensing modality features and multisensor fusion features. (b) AUC-ROC results of seven ML classifiers trained on single sensing modality features and multisensor fusion features.

落地应用：三维局部虚拟质量图谱

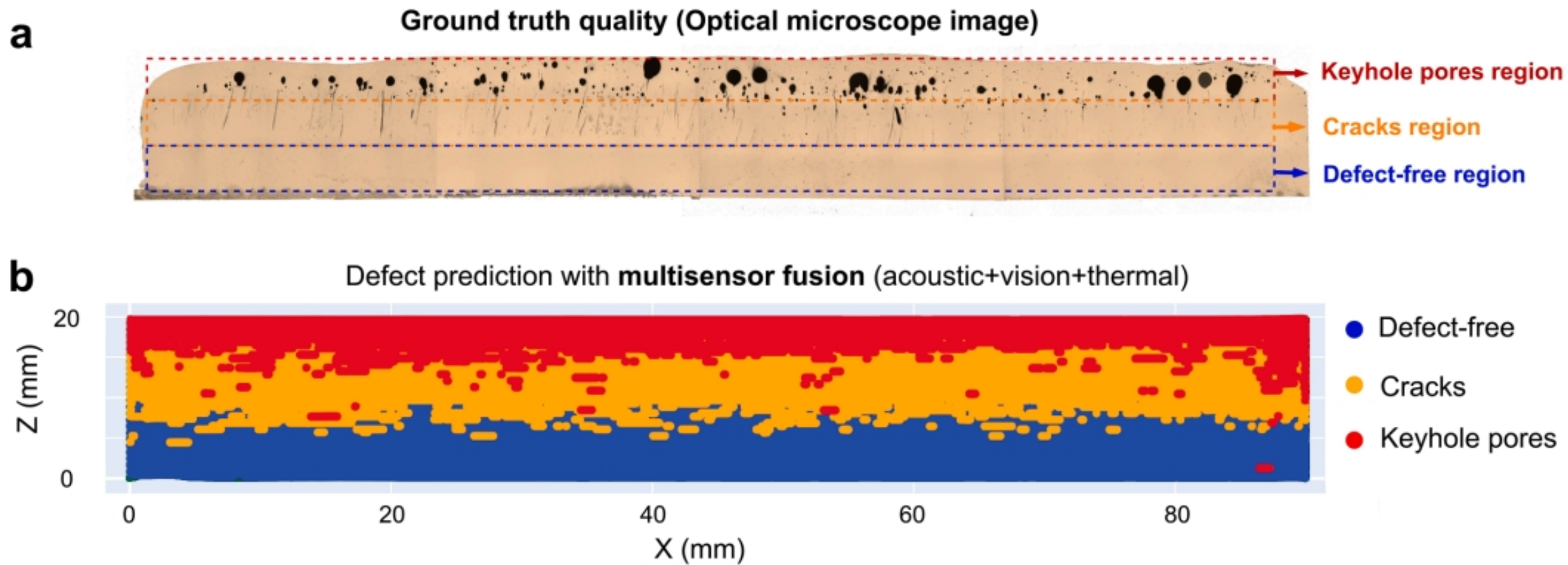
- **实体映射：**

- 将 30Hz 频率下输出的 ML 质量预测标签（如“正常”、“裂纹”、“气孔”），通过时间戳逆向映射回机器人记录的 X, Y, Z 物理坐标系中。

- **替代传统破坏性检测：**

- 生成了零件内部的三维局部质量体素图。通过与实际切开后的光学显微镜（OM）图像进行对比验证，虚拟预测的缺陷分布边界与实际缺陷位置高度吻合。
- 这使得质检环节从“事后破坏性抽检”升级为“成形过程中的全时域透明化监测”。

双击此处添加标题



总结：监测体系重构的三大支柱

- **1. 前端硬核化：**淘汰单一视觉的动态狭窄与 避免MWIR 的发射率陷阱，利用 SWIR 提供高保真热力学。
- **2. 中枢孪生化：**基于 ROS 架构与 33ms 时间窗，实现异构多传感器的强制时空对齐
- **3. 后端闭环化：**依托 95.6% 准确率的融合算法，生成 3D 虚拟质量图并驱动原位修复，完成工业智造闭环