宁波大学
NINGBO UNIVERSITY

资源受限下的精准导航：轻量化视觉SLAM系统设计与评估

从核心原理到高效实践

汇报人：李杰

项目类型：毕业设计开题答辩

项目目标：设计一套资源受限下的轻量化视觉SLAM系统

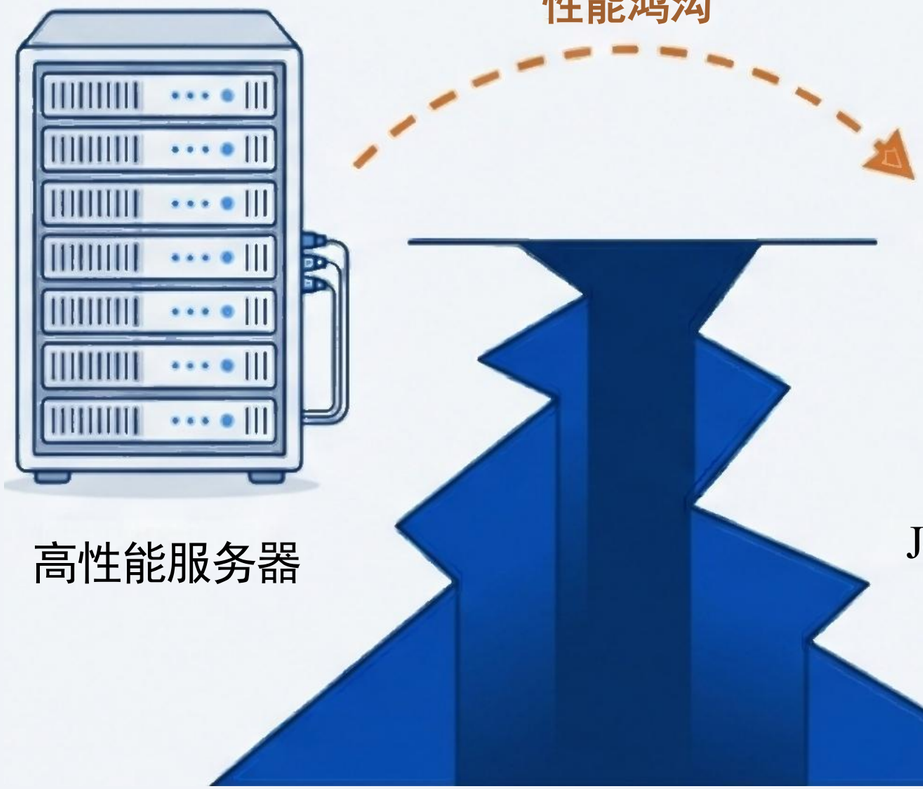
VI-SLAM： 现代自主技术的引擎

无人机自主飞行

增强/虚拟现实

移动机器人导航

核心挑战：性能与便携性的鸿沟



- 有限的CPU算力
- 紧张的内存容量
- 严格的功耗预算

基本原理：光流法如何让像素讲述运动的故事

亮度恒定

同一空间点在不同图像中的亮度保持不变。

小运动

相邻帧之间，点的位置变化非常微小。这使得灰度对位置的偏导数可以用前后帧的灰度变化来近似。

空间一致

邻近的点在图像中也相邻，并且运动相似。这为Lucas-Kanade 等方法提供了求解约束。

现有技术版图：现代VI-SLAM系统巡礼

VINS-Fusion

核心方法
优化式
(Optimization-based)

传感器支持
单目/双目+IMU

关键特性
IMU预积分，多传感器融合框架

ORB-SLAM3

核心方法
优化式
(Optimization-based)

传感器支持
单目/双目/RGB-D+IMU

关键特性
多地图系统，高召回率位置识别

Basalt

核心方法
优化式
(Optimization-based)

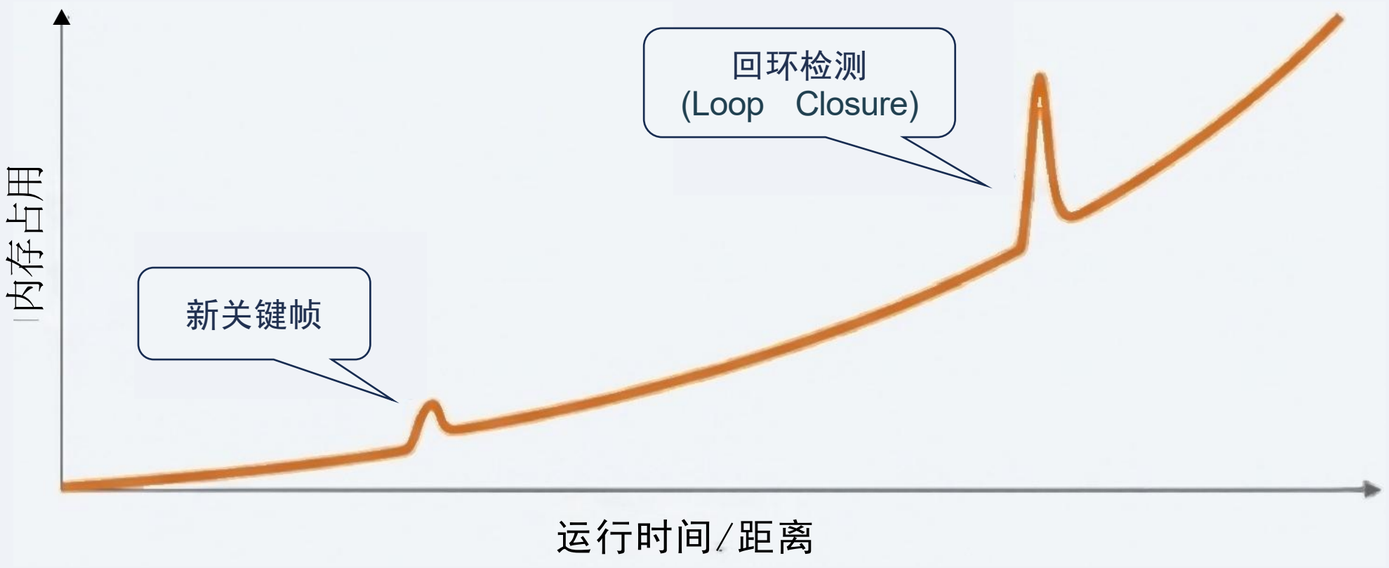
传感器支持
双目+IMU

关键特性
提取VIO信息用于后续离线建图

[Source:'Comparison of modern open-source Visual SLAM approaches'paper]

性能瓶颈：为何强大的系统难以“轻装上阵”？

在大规模或长时间运行时，计算与内存开销成为主要瓶颈。



后端优化(Back-end Optimization)

非线性优化的计算复杂度高，尤其是在回环或全局优化时，会引发CPU 负载突增。

地图点累积(Map Point Accumulation)

全局地图中的地图点数量持续增长，导致内存消耗无限制地攀升，对资源受限的机器人构成巨大挑战。

回环检测(Loop Closure)

搜索和验证回环需要大量计算资源，造成周期性的高CPU负载。

[Source:MS-SLAM Paper(Memory Problem),Thesis Proposal

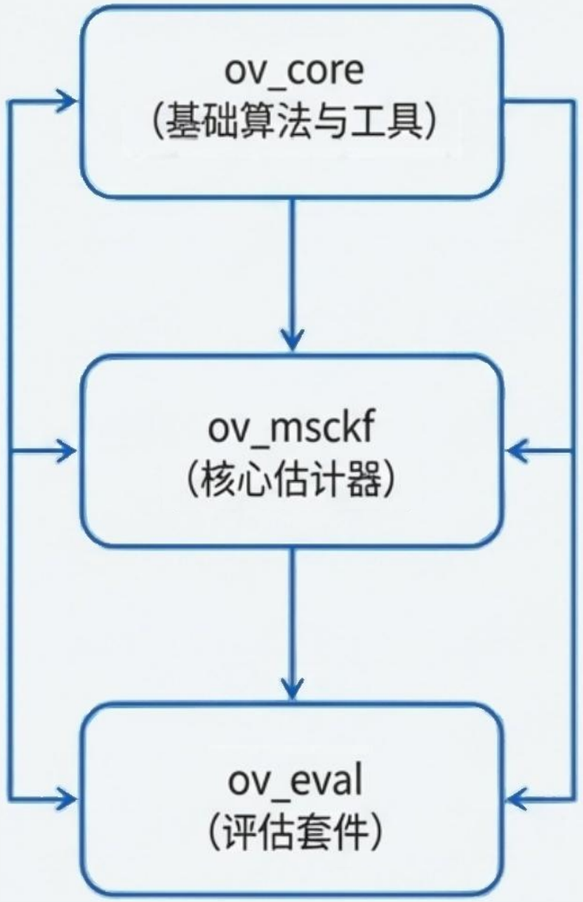
理想的实验平台：选择OpenVINS作为研究与快速原型验证的基石

模块化架构（Modular Architecture）

清晰的组件划分 (ov_core, ov_msckf,ov_eval)，便于替换和扩展。

基于多状态约束卡尔曼滤波（MSCKF-based）

以滤波为核心，为状态管理优化提供了不同于优化式方法的思路。



流形上的状态表示 (On-Manifold State Representation)

理论严谨，保证状态更新的正确性。

完备的文档与理论支持 (Comprehensive Documentation &Theory)

详尽的文档和推导，极大地降低了二次开发的门槛。

[Source:OpenVINS]

轻量化策略一：自适应前端——更智能的特征跟踪

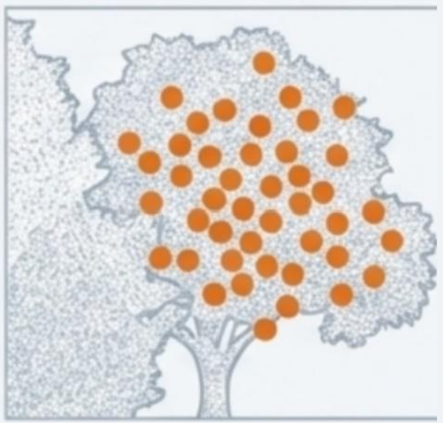
动态特征数量控制 (Dynamic Feature Count)

根据场景纹理的复杂度和当前处理负载，自适应地调整每帧提取和维护的特征点数量上限。

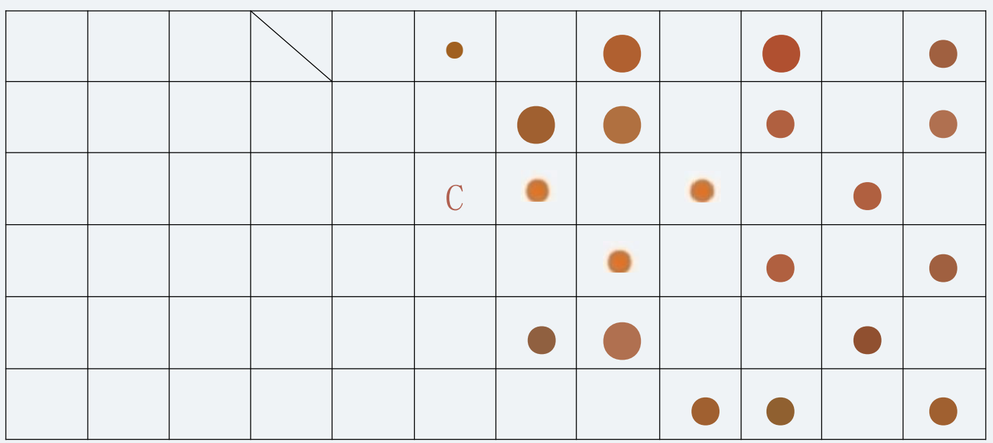
基于网格的均匀化 (Grid-based Bucketing)

将图像划分为网格，在每个网格内提取特征点，确保特征在图像中分布均匀。这不仅避免了特征点在纹理丰富区域的扎堆，还提高了后续位姿估计的几何约束质量。

优化前：特征点扎堆



优化后：特征点均匀分布



轻量化策略二：驯服后端复杂度——高效的状态管理

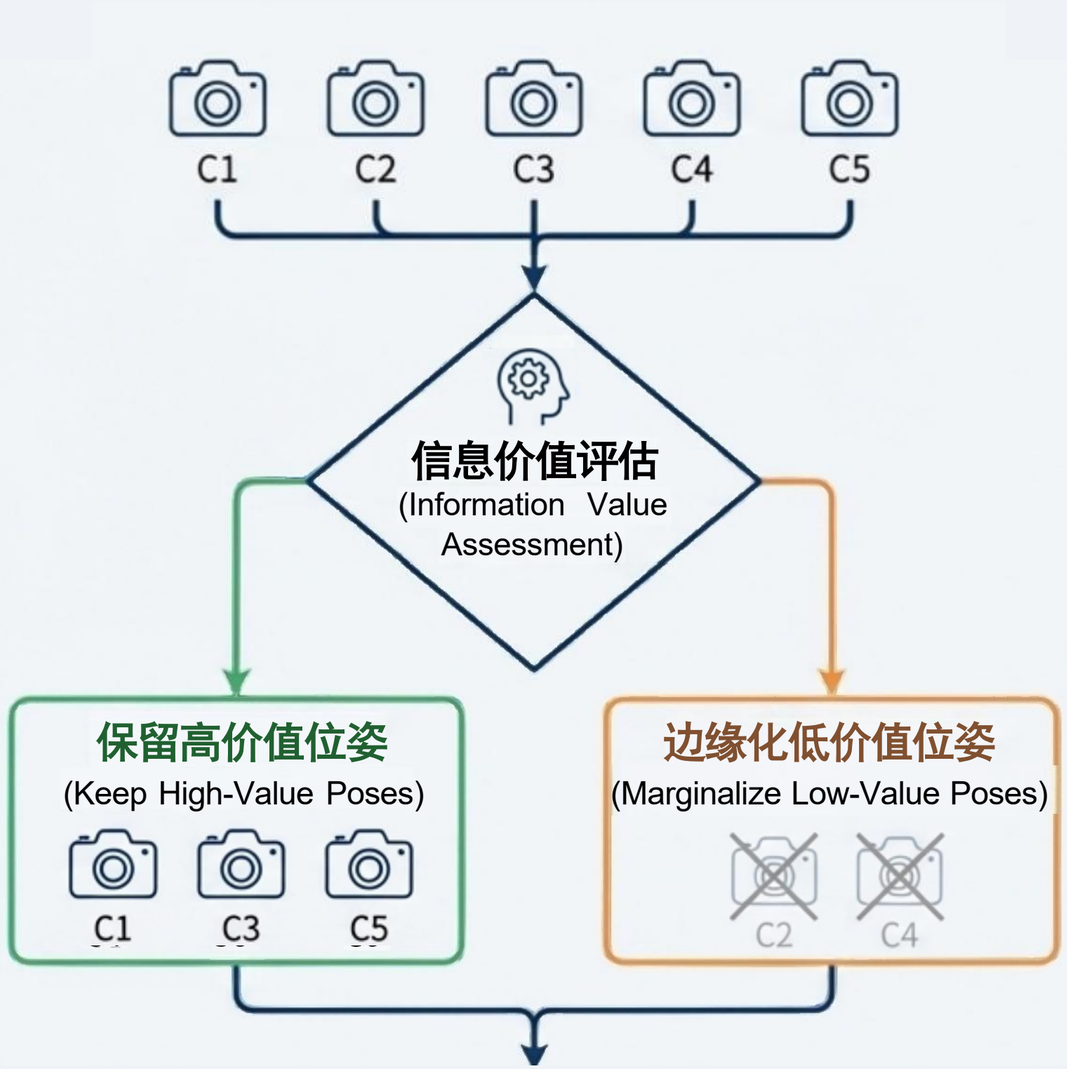
面临的问题

在MSCKF中，每次相机位姿的克隆都会导致状态协方差矩阵的维度增长（N^2复杂度），使得滤波更新的计算成本迅速增加。

解决方案：智能化的状态边缘化 (Intelligent State Marginalization)

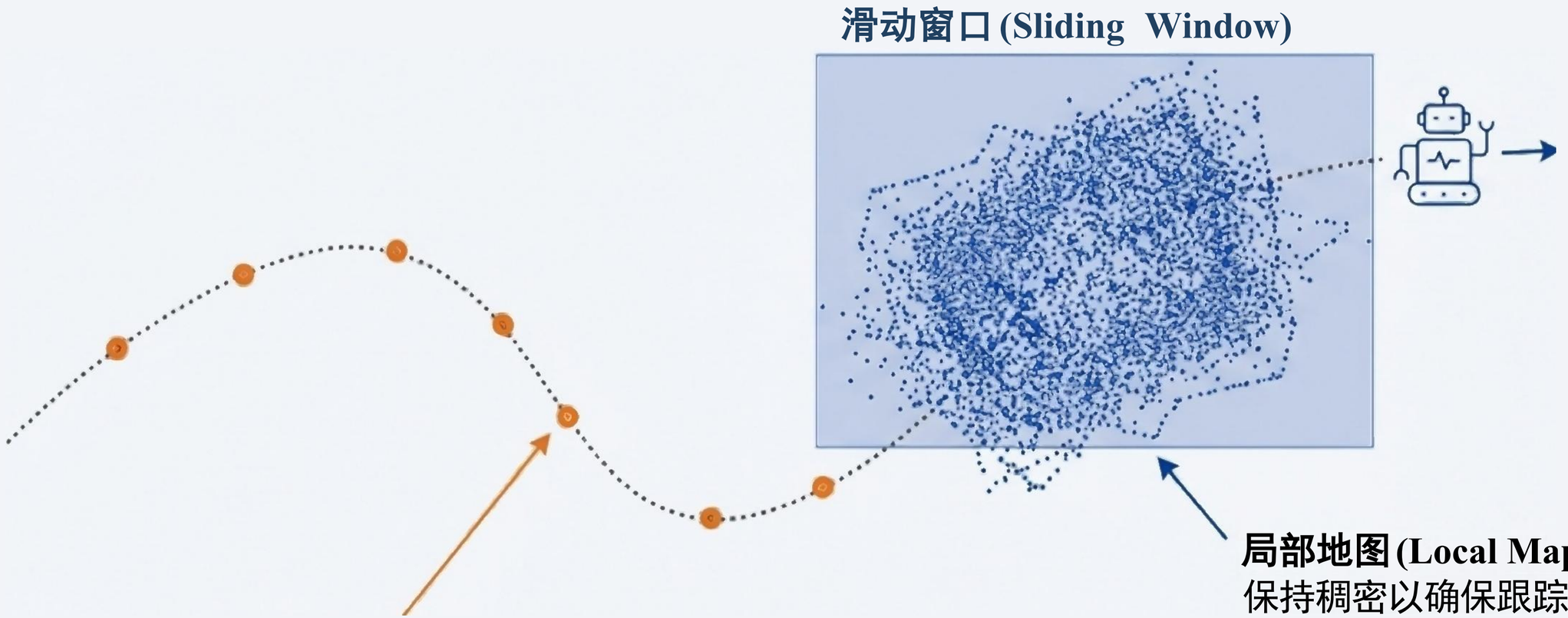
抛弃简单的先进先出（FIFO）：传统方法会简单地移除最旧的相机状态。

引入信息价值评估： 优先保留能为特征点三角化提供高信息价值的状态（例如，具有更大视差角、更好观测几何构型的相机位姿），并边缘化掉冗余或信息量低的状态。



[Source:OpenVINS Paper(MSCKF concept)]

轻量化策略三：精简地图——滑动窗口地图稀疏化



局部地图 (Local Map):
保持稠密以确保跟踪鲁棒性

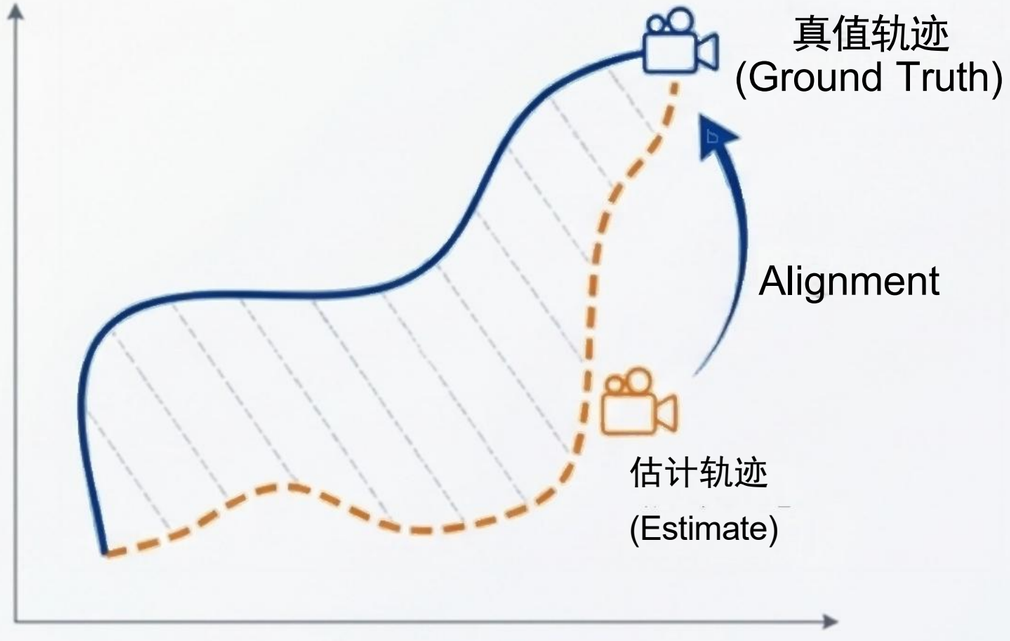
全局地图 (Global Map):
在线稀疏化，仅保留高质量回环路标

[Source:MS-SLAM Paper(Core Concept)]

成功的度量：SLAM精度评价指标

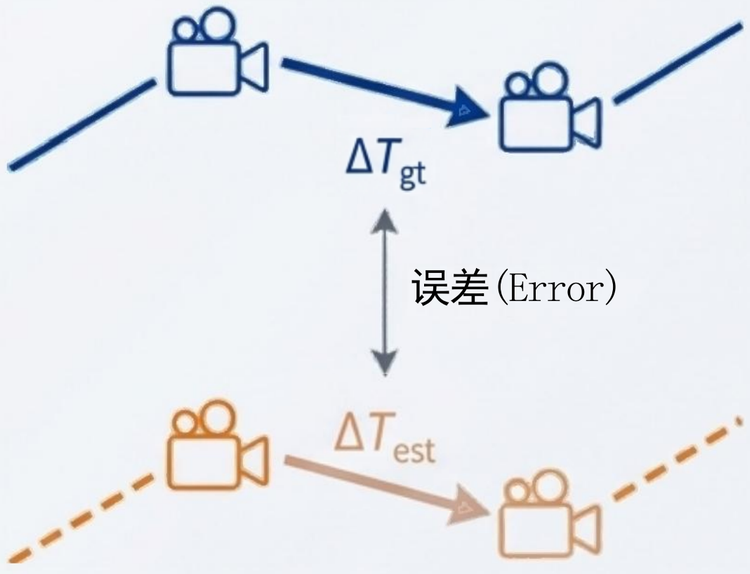
绝对轨迹误差（ATE-Absolute Trajectory Error)

用途：衡量轨迹的全局一致性，反映估计轨迹与真实轨迹的整体差异。



相对位姿误差（RPE-Relative Pose Error)

用途：衡量里程计的局部精度，评估在固定时间间隔内的漂移情况。

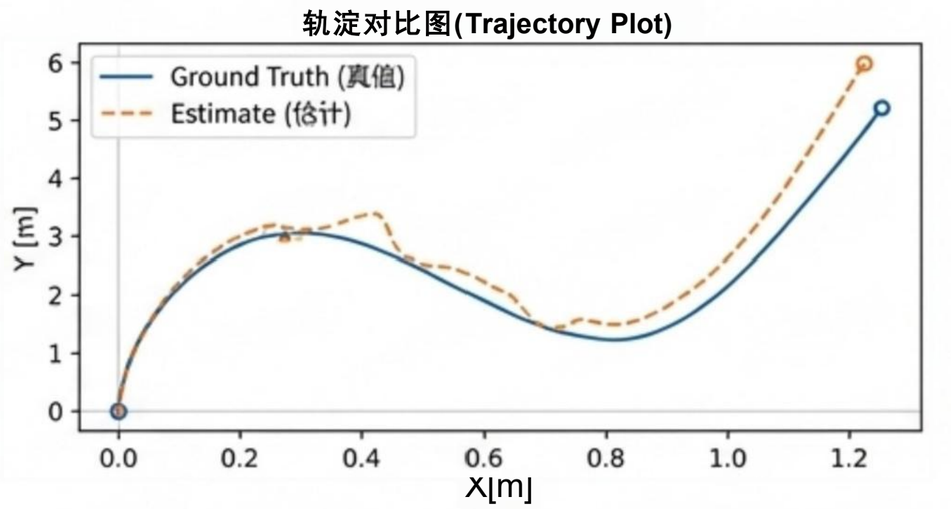


趁手的工具：使用“evo”套件进行标准化评估

evo是一个用于里程计和SLAM 轨迹评估的Python工具包，已成为该领域的标准。

功能：

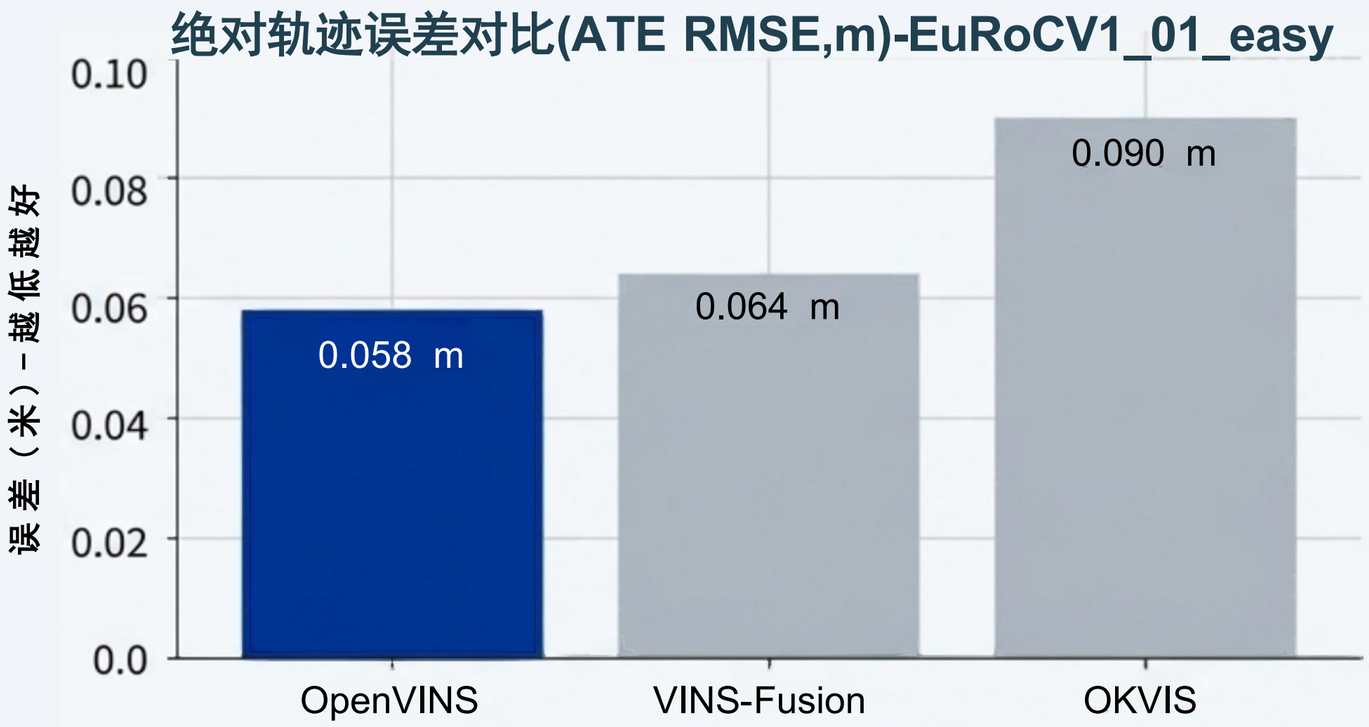
支持多种轨迹格式 (TUM,KITTI,EuRoC),
计算ATE/RPE等多种指标，
并提供丰富的可视化功能。



ATE (m)	
rmse	0.058
mean	0.049
std	0.027
min	0.012
max	0.115

基准测试：OpenVINS 的性能几何?

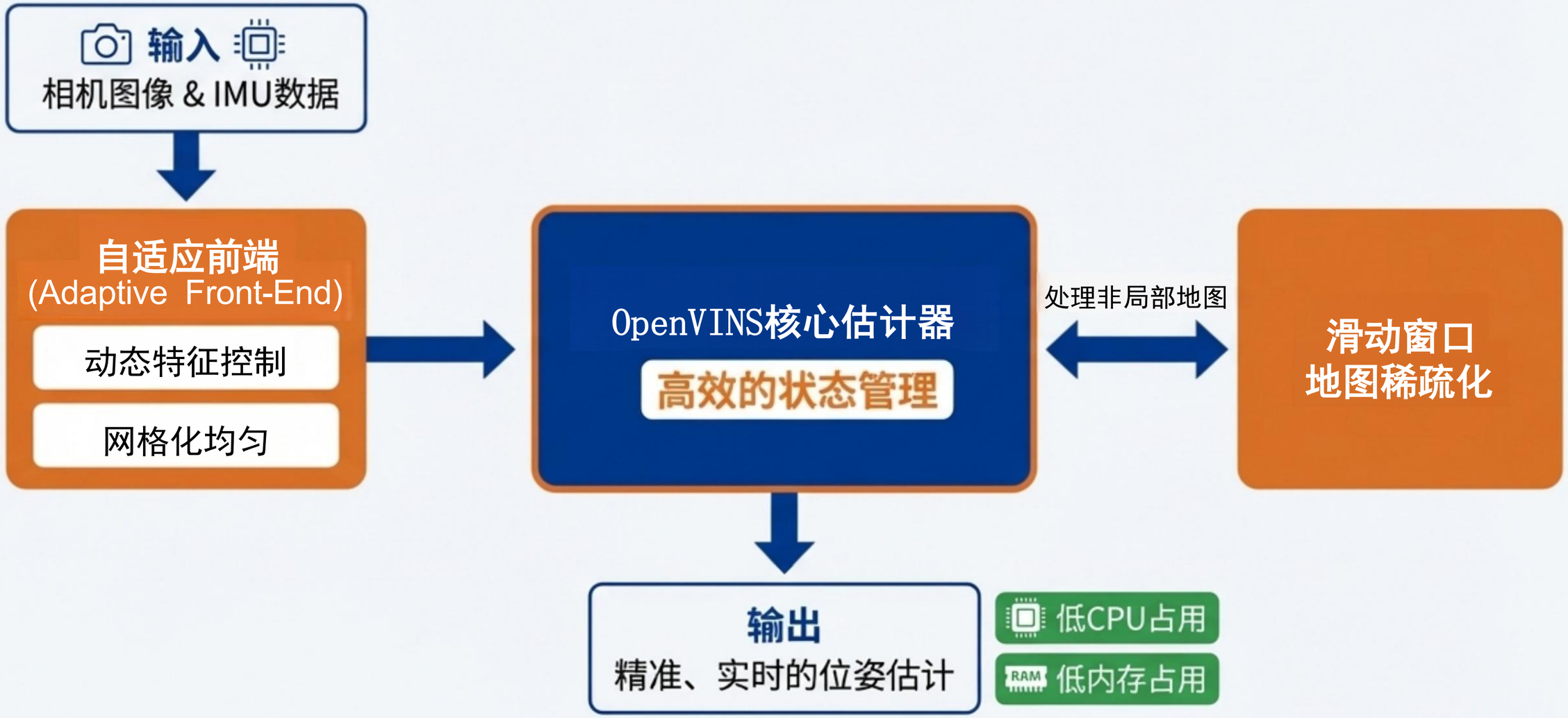
我选择的平台本身就提供了业界领先的精度，这为我的轻量化工作奠定了坚实的基础。



结论：数据表明，OpenVINS 在单目模式下的平移误差优于或持平于VINS-Fusion 和OKVIS，证明了其高精度的基线性能。

[Source:OpenVINS Paper]

集大成：轻量化VI-SLAM系统蓝图



[Source:A synthesis of the Thesis Proposal's core ideas and the architectures from OpenVINS]

结论与展望

本课题拟围绕资源受限硬件平台上的视觉–惯性 SLAM 系统，系统性研究轻量化定位与地图构建方法。

通过引入自适应前端特征处理、高效的后端状态管理机制以及在线地图稀疏化策略，构建一套面向嵌入式与边缘设备的轻量化 VI-SLAM 技术方案。

预期通过在 EuRoC MAV 与 TUM-VI 等公开数据集上的对比实验验证，在定位精度保持在可接受范围内的前提下，该方案能够有效降低系统的 CPU 计算负载与内存占用，并提升在资源受限环境中的实时性与运行稳定性。

本研究预计形成以下阶段性成果：

完成经典 VI-SLAM 系统的复现与基线性能评测；

实现并评估多种轻量化策略在前端、后端与地图管理模块中的作用效果；

在 Jetson Nano 等限算力平台上完成端到端部署与性能验证，为轻量化 VI-SLAM 的工程应用提供实验依据。

精准与轻量，并行不悖
通过智能的系统设计，在嵌入式设备上释放SLAM的全部潜力。

宁波大学
NINGBO UNIVERSITY

汇报完毕
谢谢评委老师