DOI:10.13203/j.whugis20250185 文章编号:1671-8860(2025)11-2400-01

无靶标LiDAR/IMU/Camera时空标定关键技术研究

李圣雨 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

Key Technologies for Targetless LiDAR/IMU/Camera Spatiotemporal Calibration

LI Shengyu School of Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

中图分类号:P228 文献标识码:D

现有的激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)/惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)/相机(Camera)标定方法普遍依赖特制靶标等先验知识,而且会因为采用离散时间建模而损失精度,无法满足高精度、高一致性、高灵活性的时空标定应用需求。针对多源融合对高精度时空参数的迫切需求,围绕LiDAR/IMU/Camera时空标定开展了深入的研究。针对离线和在线不同标定需求,分别建立了一套基于连续时间的LiDAR/IMU/Camera离线高精度标定体系和GNSS原始观测值辅助的LiDAR/IMU/Camera自主在线标定体系。主要工作和创新成果如下:

1)由于现有LiDAR/IMU/Camera时空标定方法普遍依赖人工靶标、重叠视场角、合理参数初值,同时存在因离散时间建模而在高动态环境中损失精度的问题,提出一种基于连续时间且无靶标依赖的LiDAR/IMU/Camera时空标定方法。该方法能在统一的框架下同时确定LiDAR/IMU/Camera之间的时空参数,有效解决了现有方法的灵活性和适用性问题。在时空参数完全未知情况下,利用运动结构恢复(structure from motion,SfM)和正态分布变换配准等方法恢复出的相机和LiDAR的离散位姿信息初始化待估时空参数,并构建以惯导为中心的连续时间轨迹。通过构建LiDAR点到面和视觉特征的数据关联,在迭代细化过程中联合优化LiDAR点到面因子、视觉重投影因子、惯导加速度因子和惯导角速度因子,解算最优的时空参数。除待估时空参数外,该方法同时支持相机内参和卷帘快门相机行扫描延迟的标定,提升了该方法的适用性。

2)近年来,受生物视觉启发的事件相机可以捕捉像素强度变化并输出异步事件流,较标准相机具有低延迟、高动态范围和高时间分辨率的优势。然而,目前事件相机/IMU的时空标定方法普遍依赖闪烁靶标,限制了标定的灵活性和适用性。此外,现有事件相机标定方法大多需要使用标准图像或事件累积帧,但标准图像帧并不总是可用的,且存在着噪声大和运动模糊等问题。针对此问题,提出了基于原始事件流的事件相机/IMU时空标定方法。首先建立一种滑动窗口机制,通过最大化扭曲事件图像的对比度来估计事件相机的角速度。随后,通过维护姿态样条曲线,联合优化事件相机和IMU的角速度因子,实现事件相机与IMU之间的旋转空间参数和时延参数初始化。在此基础上,进一步将扭曲事件图像的对比度最大化过程与连续时间轨迹关联耦合,以在批次优化中精化初值。

3)集成多个同构或异构传感器的冗余设计不仅能够提高状态估计的精度,还能为系统提供额外的安全保障,有效降低误判风险。然而,目前多LiDAR/多IMU/多Camera系统的标定结果主要通过传递两两传感器标定结果实现,无法保证标定结果的整体一致性。此外,主流标定方法通常依赖于感知型传感器之间的重叠视场角来构建共视特征的几何约束,这与系统分散布置感知传感器以有效缩小视野盲区、增加有效信息的初衷相悖。针对上述问题,提出基于虚拟传感器中心化的多LiDAR/多IMU/多Camera统一时空标定方法。在创新点1)基础上,基于中心化原则构建了虚拟的LiDAR、IMU和Camera,以连接所有冗余传感器。与传统方法选择频率最高或误差最小的传感器作为参考不同,该方法允许统一建模所有传感器的观测值而不依赖于传感器的先验知识。针对LiDAR传感器缺失导致单目尺度歧义问题,提出基于简化预积分的视觉尺度和重力向量的初始化方法。通过引入参考帧位姿简化预积分项,联合视觉SfM位姿序列求解尺度信息以及时序窗口首尾的预积分速度项。

4)随着时间的推移,传感器之间的时空关系可能会因温度变化、机械磨损等因素而发生改变,这会影响多源信息融合的最终效果。为此,充分利用移动车辆广泛搭载的GNSS接收机,提出GNSS原始观测值辅助的车载LiDAR/IMU/Camera时空在线补偿方法。通过分段线性定常系统对全时空参数的可观测性进行深入分析,明确典型退化运动与不可观测参数之间的映射关系,为在线标定过程中的参数估计提供理论基础。在此基础上,提出基于雅可比域的可观测性约束方法,防止弱可观条件下参数的错误估计和方差的错误收敛。

作者简介:李圣雨,2025年6月毕业于武汉大学,获工学博士学位(指导教师:李星星教授),研究方向为多源融合时空标定与导航定位。lishengyu@whu.edu.cn

引文格式:LI Shengyu. Key Technologies for Targetless LiDAR/IMU/Camera Spatiotemporal Calibration[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(11):2400. DOI:10.13203/j.whugis20250185.(李圣雨. 无靶标LiDAR/IMU/Camera时空标定关键技术研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(11):2400. DOI:10.13203/j.whugis20250185.)