

北斗动态定位耦合三维激光扫描测绘点云配准优化技术研究

刘家明

身份证号码：360731199511237137

DOI: 10.32629/ems.v8i8.21613

[摘要] 面向大范围室外三维激光扫描点云存在的全局基准缺失与误差累积问题,提出一种北斗动态定位约束下的点云配准优化方法。通过北斗高精度轨迹引导粗配准搜索方向,构建融合绝对坐标约束的加权点到面精配准模型,并引入因子图优化实现多源信息全局一致性调整。实验表明,该方法有效抑制了长基线扫描中的轨迹漂移,显著提升了点云拼接的绝对几何精度与作业效率,为高精度实景三维建模提供了可靠的技术途径。

[关键词] 北斗动态定位; 三维激光扫描; 点云配准

引言

随着数字孪生城市与新型基础测绘的快速发展,三维激光扫描技术因其高效获取空间信息的优势被广泛应用。然而,在大尺度室外场景中,传统点云配准过度依赖标靶或几何特征,易受环境干扰导致全局基准不统一及误差累积。北斗三号全球卫星导航系统的建成,为动态载体提供了厘米级绝对位姿服务。探索北斗动态定位与激光点云的深度融合机制,解决无控条件下点云的绝对定向与精度保持难题,已成为当前测绘领域的研究热点。

1 三维激光扫描与点云数据基础理论

三维激光扫描技术基于主动发射激光脉冲并接收目标反射信号,通过精密测量激光往返时间或相位差解算目标点与扫描中心的距离,结合内置编码器同步记录水平与垂直扫描角度,在仪器坐标系内快速获取海量离散三维坐标集合,即点云数据。点云作为空间实体的非接触式数字化表征,其数据结构包含空间坐标XYZ及可选的强度信息与色彩信息,能够高精度还原地物表面的几何形态与空间拓扑关系。由于扫描过程中存在视场遮挡与视角差异,单次扫描难以覆盖复杂场景的全部表面,需通过多测站扫描实现全覆盖,进而引入点云配准这一关键环节,旨在将不同坐标系下的局部点云统一至同一全局参考框架。点云数据的质量受扫描分辨率、测距精度及环境噪声影响,其后续处理涉及去噪、精简、特征

提取与曲面重建,构成了从物理空间到数字模型转换的理论基石,为高精度测绘与三维实景建模提供核心数据支撑。

2 北斗高精度动态定位技术原理

2.1 北斗载波相位差分定位原理

北斗载波相位差分定位技术通过基准站与流动站间的同步观测实现厘米级动态定位精度,其核心在于利用两台及以上接收机同步跟踪北斗卫星的载波相位信号,基准站将观测值与已知精确坐标比对,实时解算各类误差的空间相关性模型。系统通过数据通信链将误差改正数或原始观测值播发给流动站,流动站利用这些信息进行误差抵消处理。关键技术环节在于整周模糊度的动态固定,通过宽巷窄巷组合及最小二乘模糊度降相关平差方法,在动态环境中快速确定载波相位整周数。当模糊度成功固定后,系统通过双差观测方程消除卫星钟差与接收机钟差,利用载波波长极短的特性获得毫米级量级的观测残差,最终解算出流动站相对于基准站的基线向量。该技术需维持连续稳定的卫星信号与数据链路,在遮挡环境下易出现模糊度重置导致精度降级。

2.2 精密单点定位实时动态增强原理

精密单点定位实时动态增强技术依托全球地面监测网络生成的精密改正信息,使单机接收机摆脱对本地基准站的依赖。系统通过全球分布的参考站网实时估计卫星轨道误差、时钟偏差、码间偏差及电离层延迟等产品,经由卫星通信或

网络链路广播给用户终端。用户终端结合北斗三频观测数据与实时精密产品，构建非差观测方程，通过卡尔曼滤波进行参数估计。其核心突破在于利用超快速轨道与钟差产品将卫星端误差削弱至厘米级，同时采用无电离层组合消除一阶电离层影响，通过区域大气模型修正残余对流层延迟。系统通过状态域改正数的实时播发，使流动站接收机在单点模式下即可实现动态厘米级定位，特别适用于广域无人区与海洋等缺乏基准站覆盖的区域，显著提升了定位服务的空间连续性与可用性。

2.3 多传感器紧耦合动态定位原理

多传感器紧耦合动态定位技术通过深度融合北斗观测值与惯性测量单元数据，构建高频率抗干扰的组合导航系统。该系统以惯性导航解算为核心，利用陀螺仪与加速度计测量载体角速度与比力，通过力学编排实时推算位置速度姿态信息。北斗观测值作为外部量测更新源，通过扩展卡尔曼滤波或因因子图优化算法对惯性导航的累积误差进行周期性校正。关键技术在于建立严密的时间同步机制与空间杆臂补偿模型，将不同坐标系下的异构观测统一至载体中心参考系。系统采用误差状态卡尔曼滤波架构，将惯性器件零偏与北斗整周模糊度作为待估参数纳入状态向量，通过松耦合向紧耦合的演进，直接使用原始伪距与载波相位观测值而非解算后的位置结果。这种深层融合机制使得在卫星信号短暂失锁时仍能依靠惯性递推维持连续定位，在动态复杂环境中展现出优异的鲁棒性与平滑的轨迹输出特性。

3 北斗-激光点云时空耦合与误差分析

3.1 北斗-激光点云时空基准统一与同步机制

北斗动态定位输出的绝对位姿信息与三维激光扫描采集的点云数据分别隶属于不同的时空参考框架，实现二者的有效耦合首先依赖于严密的时空基准统一。在时间维度上，系统需构建高精度时间同步链路，以外部秒脉冲信号或内部恒温晶振为基准，通过硬件触发或软件时间戳对齐北斗定位历元与激光扫描采样时刻，消除因载体运动导致的动态时延误差。在空间维度上，必须精确标定北斗天线相位中心与激光扫描仪旋转中心之间的杆臂偏移量与姿态安装角，通过三维

刚性变换将北斗解算的地理坐标系位姿传递至激光传感器坐标系。该过程涉及 WGS84 椭球坐标系、局部笛卡尔坐标系与扫描仪极坐标系的多重转换，任何标定残差都会直接转化为点云配准的系统偏差。

3.2 多源误差传播机理与耦合干扰分析

北斗与激光点云融合系统中的误差来源具有显著的复杂性与传导性，深入剖析其传播机理是优化配准精度的前提。北斗动态定位误差主要包括卫星轨道钟差残差、电离层对流层延迟修正残差以及多路径效应引起的噪声，这些误差会直接污染用于点云全局约束的绝对坐标基准。激光扫描误差则涵盖测距噪声、角度分辨率限制以及扫描镜面的非线性振动，导致点云几何形态失真与特征提取偏差。在耦合过程中，两类误差相互交织，北斗的粗差可能误导点云配准的收敛方向，而点云特征退化则会削弱后端优化算法对北斗模糊度固定的校验能力。同时，载体振动引起的杆臂向量动态变化若未被实时补偿，将在高速动态扫描中产生显著的视准轴偏差，这种时空耦合干扰最终表现为点云模型的局部扭曲与全局尺度变形，严重影响测绘成果的可靠性。

4 基于北斗动态约束的点云配准算法优化

4.1 北斗先验引导的粗配准搜索空间约束方法

传统点云粗配准在室外大场景下面临计算复杂度高与误匹配风险大的挑战，引入北斗动态定位成果可显著提升匹配效率。该方法首先利用相邻扫描站点间北斗解算的概略基线向量，直接确立点云坐标变换的初始平移参数，将六自由度求解问题简化为三自由度旋转估计。在此基础上，依据北斗定位状态构建置信度权重，对基于随机采样一致性的特征匹配施加空间约束。系统根据北斗固定解的精度水平设定合理的旋转角搜索区间，剔除明显偏离北斗先验位姿的变换假设，大幅压缩候选变换矩阵的解空间。针对北斗浮点解或信号短暂失锁区域，算法自动放宽约束边界，采用自适应阈值平衡先验依赖与几何特征匹配。该方法显著降低了粗配准迭代次数，提高了初始变换矩阵的稳健性，为后续精配准提供了高质量的收敛初值。

4.2 融合北斗绝对坐标的加权点到面精配准模型

针对经典迭代最近点算法缺乏绝对尺度基准且易产生累积误差的局限，构建融合北斗绝对观测值的加权点到面精配准目标函数。该模型在传统最小化对应点距离平方和的基础上，增设北斗绝对坐标约束项，将北斗动态定位解算的扫描站位视作虚拟观测点。目标函数由几何残差与北斗绝对坐标残差两部分组成，前者采用点到平面距离度量以利用平面结构特征提高收敛精度，后者衡量当前估计的扫描仪位置与北斗观测值之间的差异。关键在于设计基于北斗定位质量因子的自适应权重分配机制，当北斗处于固定解状态时赋予绝对约束项较高权重，强制点云配准结果贴合地理框架；当北斗信号受遮挡降级时，则逐步降低其权重，转而信赖点云的几何结构一致性。通过引入鲁棒核函数抑制北斗粗差与点云离群点的影响，该模型实现了相对几何观测与绝对定位约束的有机统一，在保证点云内部精细结构的同时，有效控制了全局尺度的漂移误差。

4.3 基于因子图优化的多源信息全局一致性调整

为了彻底消除多站扫描过程中的误差累积，采用基于因子图优化的后端处理方法对全序列点云进行全局一致性调整。在该框架下，将每一次扫描的位姿抽象为因子图中的变量节点，连接这些节点的边则由不同类型的约束因子构成。具体包括激光里程计因子，编码相邻帧或相邻站间点云配准的相对运动约束；北斗动态定位因子，将每一个有效历元的北斗解算坐标作为绝对测量值引入图结构，充当全局锚点；以及闭环检测因子，识别重复观测场景以修正历史轨迹偏差。系统构建全局非线性最小二乘问题，通过高斯牛顿法迭代求解最优位姿配置。北斗因子的引入打破了激光里程计的漂移瓶颈，特别是在长基线扫描任务中，能够有效拉紧轨迹松弛部分。优化过程充分考虑北斗观测值的时空相关性，对不同时段不同状态的北斗数据进行差异化建模，最终输出一组既符合点云几何一致性又满足北斗绝对坐标约束的全局最优位姿序列，显著提升了大规模点云场景的整体拼接精度与平顺性。

4.4 北斗信号失锁下的自适应降级容错策略

面对复杂作业环境中北斗信号频繁失锁或精度骤降的挑

战，算法设计了多层次的自适应降级容错机制以保障配准过程的连续性。系统实时监控北斗定位状态，建立信号质量评估模型。当检测到连续失锁或精度因子恶化时，算法自动切换工作模式，暂时屏蔽北斗绝对约束因子，转为依赖点云几何约束为主的纯激光里程计模式。在此模式下，通过强化局部点云特征匹配权重与惯性测量单元预积分约束，维持短时间内的位姿推算能力。同时，利用历史北斗有效观测数据构建局部先验地图，通过扫描到地图的匹配方式提供相对可靠的位姿参考。一旦北斗信号恢复且通过完好性监测，系统立即重新激活绝对约束因子，并利用因子图的增量更新特性，快速将新观测融入全局优化框架，修正信号丢失期间的轨迹漂移。这种分级响应机制确保了算法在各种恶劣环境下均能输出连续平滑且高精度的点云配准结果。

结束语

引入北斗动态定位作为绝对约束，能够有效打破纯激光扫描配准的误差传播链，通过前后端一体化的优化策略，实现了点云几何结构与地理坐标基准的统一。该方法在复杂环境下表现出较强的鲁棒性，显著提升了测绘产品的绝对精度。未来随着北斗 PPP-RTK 服务的普及与边缘计算能力的提升，该技术有望在智能矿山、交通巡检等领域实现实时化、轻量化应用，进一步拓展实景三维建设的广度与深度。

[参考文献]

- [1] 谢永祥. 北斗定位技术在深部矿井巷道方向测量中的稳定性优化研究[J]. 世界有色金属, 2025, (23): 184-186.
- [2] 刘晴. 北斗卫星导航在三维地理信息建模中的应用[J]. 北斗与空间信息应用技术, 2025, (5): 118-121.
- [3] 闫野. 基于北斗定位优化的无人机铁路巡检路径研究与应用[J]. 智能城市, 2025, 11(7): 29-32.
- [4] 严尔梅, 时磊, 刘博迪, 等. 基于北斗定位和数据融合的输电线路在线监测应用研究[J]. 电力信息与通信技术, 2025, 23(6): 23-30.
- [5] 王猛. 基于机器视觉与北斗定位的料堆识别及测距方法研究[D]. 山东交通学院, 2025.