

基于BIM+GNSS的市政道路施工动态测量误差控制技术 研究

何俊峰

中交一公局第九工程有限公司 广东 广州 511356

摘要: 本文针对市政道路施工过程中动态测量误差控制难题, 提出一种融合建筑信息模型(BIM)与全球导航卫星系统(GNSS)的协同技术框架。首先, 分析市政道路施工中动态测量的主要误差来源, 包括GNSS信号多路径效应、大气延迟、设备安装偏差及BIM模型与现场数据不一致等; 其次, 构建BIM+GNSS融合的动态测量系统架构, 设计数据交互机制与误差补偿模型; 再次, 提出基于BIM语义信息的GNSS观测值动态修正算法, 并引入卡尔曼滤波与RTK/PPK融合策略提升定位稳定性; 最后, 通过某城市主干道改造工程实例验证所提方法的有效性。结果表明, 该技术可将施工动态测量平面定位误差控制在 $\pm 1.5\text{cm}$ 以内, 高程误差控制在 $\pm 2.0\text{cm}$ 以内, 显著优于传统测量方法, 有效提升了市政道路施工的精度与智能化水平。

关键词: BIM; GNSS; 市政道路; 动态测量; 误差控制; 智能施工

引言

市政道路是城市基础设施的关键部分, 施工质量关乎交通效率与出行安全。当下“新基建”“智慧城市”战略推进, 市政工程加速数字化、智能化转型, 施工过程高精度动态测量与实时误差控制成提升工程质量与管理效能的关键瓶颈。传统市政道路施工测量依赖光学仪器, 有作业效率低、依赖人工、难连续动态监测等缺陷。GNSS技术虽有全天候、高效率等优势, 但在城市复杂环境中易受干扰, 定位精度下降, 且信息缺乏工程语义关联^[1]。BIM技术能集成多维信息提供数字化平台, 与GNSS融合可双向映射, 但当前集成多停留在数据可视化, 缺乏误差建模与补偿机制。为此, 本文聚焦市政道路施工, 研究BIM与GNSS深度融合的动态测量误差控制技术, 构建协同系统, 为智能施工提供理论与技术支撑。

1 市政道路施工动态测量误差来源分析

在市政道路施工过程中, 动态测量误差呈现出多源性与耦合性特征, 其产生机制复杂, 需从系统内部、传播路径、设备安装及模型一致性等多个维度进行系统剖析。

1.1 GNSS系统误差

GNSS系统本身存在固有误差, 如卫星钟差、星历误差以及接收机钟差等。尽管现代差分技术(如RTK、PPK)可在一定程度上消除这些系统性偏差, 但在城市峡谷等信号受限区域, 基准站与流动站间距离受限, 差分改正效果显著衰减, 残余误差仍可能达到厘米级, 对高精度施工构成威胁。

1.2 传播路径误差

信号在传播路径中受到大气层影响, 产生电离层与对流层延迟。电离层延迟与太阳活动周期密切相关, 而对流层延迟则受局部温湿度与气压变化调控, 尤其在低仰角卫星观测时更为显著。此外, 城市环境中密集的建筑物、临时围挡、施工车辆等反射体导致GNSS信号发生多路径效应, 即直射信号与反射信号同时被接收机捕获, 造成伪距与载波相位观测值失真^[2]。这一现象是城市GNSS定位误差的主要来源之一, 且具有强时空随机性, 难以通过常规模型完全消除。

1.3 接收机与天线误差

接收机与天线的物理特性亦引入不可忽视的误差。GNSS天线的相位中心并非几何固定点, 其位置会随入射信号方向变化而偏移, 若未采用精确的相位中心校正模型, 将引入系统性偏差。同时, 在施工机械(如摊铺机、平地机)上安装GNSS天线时, 若未严格校准其与作业面的几何关系(如杆高、偏心距), 则实测坐标与实际施工面之间存在几何映射误差, 直接影响高程控制精度, 尤其在道路纵坡变化区域更为敏感。

1.4 BIM模型与现场偏差

BIM模型与施工现场的不一致性亦构成一种“语义误差”。BIM模型通常基于设计阶段的理想化条件构建, 而实际施工中常因地质条件变化、地下管线迁改、临时交通组织调整等因素导致现场地形与模型存在偏差。若将GNSS实测点直接匹配至未更新的BIM模型, 可能误判为测量误差, 进而误导施工调整决策, 形成“模型失真一

误判误差—错误修正”的恶性循环。因此，误差控制不仅需关注测量系统本身，还需考虑模型与现实的一致性维护。

2 BIM+GNSS 融合的动态测量系统架构

为系统性应对上述误差挑战，本文构建了一套四层协同的BIM+GNSS融合动态测量系统架构，涵盖数据感知、处理、融合与应用四个逻辑层次，实现从原始观测到智能决策的闭环控制。

2.1 数据感知层

在数据感知层，系统部署支持多频多系统（如GPS/BDS/Galileo/GLONASS）的高精度GNSS接收机，并辅以惯性测量单元（IMU）、激光测距仪等传感器，集成于施工机械或移动测量平台之上，以同步获取位置、姿态、环境反射强度等多源异构数据，为后续融合处理提供丰富输入。

2.2 数据处理层

数据处理层负责对原始观测值进行预处理与初步解算。该层首先对GNSS伪距与载波相位观测值进行周跳探测与修复，剔除信噪比过低或受干扰严重的卫星信号；随后，根据现场通信条件动态切换RTK与PPK模式——在基准站信号覆盖良好区域采用RTK实现实时厘米级定位，在信号遮挡严重区域则记录原始观测数据，事后通过PPK处理提升定位可靠性；同时，结合多路径组合观测值（如MP1、MP2）与信噪比序列，识别并抑制多路径效应的影响，提升观测质量^[3]。

2.3 模型融合层

模型融合层是系统的核心，承担BIM与GNSS数据的深度耦合任务。该层首先对设计阶段构建的BIM模型（如Revit或Civil3D格式）进行轻量化处理，并统一转换至施工所用的地方独立坐标系或国家大地坐标系，确保空间基准一致；继而构建语义映射引擎，将GNSS实测点依据其空间位置与邻近关系，自动关联至BIM中的对应构件（如路基、排水管、检查井等），实现从“坐标点”到“工程对象”的语义跃迁；在此基础上，利用BIM提供的道路设计高程、纵坡、平曲线等先验信息，构建动态误差补偿模型，对GNSS观测值进行上下文感知的实时修正。

2.4 应用服务层

应用服务层面向施工管理实际需求，提供施工放样引导、质量偏差预警、进度比对分析等智能化服务。系统支持Web端与移动端可视化，施工人员可实时查看当前位置与设计模型的偏差热力图，管理人员则可基于历史数据生成质量评估报告，实现“测-控-管”一体化闭环管

理，显著提升施工协同效率与决策科学性。

3 基于 BIM 语义的动态误差控制方法

3.1 BIM驱动的GNSS高程误差修正模型

市政道路设计具有明确的纵断面线形特征。设某桩号处设计高程为 H_{design} ，GNSS实测高程为 H_{GNSS} ，则高程残差为：

$$\Delta H = H_{GNSS} - H_{design}$$

在短距离内（如50m），若施工面平整且无沉降 ΔH 可视为系统性偏差。利用BIM模型提供的连续设计高程，可构建滑动窗口内的高程误差趋势面：

$$\Delta \hat{H}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta H_i \cdot w(d_i)$$

其中 $w(d_i)$ 为距离权重函数（如高斯核）， d_i 为当前点与历史点距离。据此对新观测点进行高程修正：

$$H_{corrected} = H_{GNSS} - \Delta \hat{H}(x)$$

3.2 多源融合的卡尔曼滤波定位算法

为提升动态定位稳定性，构建状态向量 $X = [x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T$ ，融合GNSS位置、IMU加速度与角速度、BIM约束信息。系统状态方程为：

$$X_k = F_{k-1} X_{k-1} + w_{k-1}$$

观测方程包含GNSS观测值 Z_{GNSS} 与BIM几何约束 Z_{BIM} ：

$$Z_k = H_k X_k + v_k$$

其中，BIM约束可表示为道路中心线距离约束或高程面约束。通过扩展卡尔曼滤波（EKF）实现状态估计，有效抑制GNSS跳变与噪声。

3.3 动态环境下的多路径识别与剔除

利用BIM模型提供的周边建筑物三维轮廓，结合GNSS卫星方位角与仰角，预测潜在多路径反射区域^[4]。若某卫星信号入射方向与建筑物表面法向量夹角小于阈值，则标记为高风险卫星，在定位解算中降权或剔除。该方法较传统SNR阈值法更具场景适应性。

4 工程应用与验证

为验证所提技术的工程适用性，本文选取某市一条全长2.3公里的城市主干道改造工程作为试验段。该路段为双向六车道，包含多个交叉口、雨水管道系统、人行道及绿化带，且周边高楼林立，GNSS信号遮挡严重，具有典型的复杂施工环境特征。在BIM建模方面，采用Civil3D平台构建了包含路线、纵断面、横断面及地下管线的精细化BIM模型，并统一至CGCS2000坐标系；在硬件部署上，选用支持BDS-3/GPS双频的高精度RTK接收机，分别安装于沥青摊铺机与移动测量小车上，确保施工过程与质量抽检的全覆盖；软件层面，自主开发了

BIM+GNSS协同平台,支持IFC模型加载、实时点云叠加与偏差热力图生成。

在试验段内选取10个典型断面(涵盖直线段、平曲线段及交叉口区域),分别采用传统全站仪测量、常规RTK测量与本文提出的BIM+GNSS融合方法进行对比测试。结果显示,传统全站仪虽精度最高(平面 $\pm 0.8\text{cm}$,高程 $\pm 0.6\text{cm}$),但单点测量耗时长达45-60秒,难以满足动态施工需求;常规RTK方法效率显著提升(单点3-8秒),但受多路径与遮挡影响,平面与高程中误差分别达到 $\pm 2.5\text{cm}$ 与 $\pm 4.2\text{cm}$;而本文方法在保持高效(单点3-5秒)的同时,将平面与高程中误差分别控制在 $\pm 1.3\text{cm}$ 与 $\pm 1.8\text{cm}$ 以内,精度较常规RTK提升近50%。尤其在交叉口等信号复杂区域,BIM语义约束有效抑制了GNSS定位跳变,轨迹连续性明显改善。以某弯道段为例,传统RTK在建筑物遮挡侧出现+3至+5cm的高程正偏差,而融合方法通过动态修正,将偏差稳定控制在 $\pm 2\text{cm}$ 范围内,充分验证了所提误差控制策略的有效性。

5 讨论

尽管本文所提技术在工程实践中取得了良好效果,但仍面临若干现实挑战。首先,BIM模型的时效性问题不容忽视。若施工现场发生重大设计变更(如管线临时改道、路基加宽等),而BIM模型未能同步更新,则基于旧模型的误差修正将失效甚至产生误导。未来需探索结合无人机倾斜摄影与人工智能图像识别技术,实现施工现场的自动扫描与BIM模型的半自动更新机制,确保数字孪生体与物理实体的一致性。其次,当前BIM与GNSS生态存在厂商壁垒,不同品牌设备与软件间的数据格式差异较大,制约了系统的互操作性。推广过程中应加强IFC、LandXML等开放标准的应用,推动行业数据接口的统一。此外,高精度GNSS接收机与专业BIM建模的成本较高,目前主要适用于大型市政项目,对于中小型工程而

言经济性不足。未来可探索基于低成本GNSS模块与轻量化BIM(如LOD200级别)的简化方案,降低技术门槛。值得期待的是,随着5G通信与边缘计算技术的发展,部分计算密集型任务(如卡尔曼滤波、射线追踪)可下沉至施工现场边缘节点执行,进一步降低系统延迟,提升实时响应能力,为BIM+GNSS融合技术的规模化应用奠定基础。

6 结语

本文针对市政道路施工动态测量中的误差控制难题,提出了一种基于BIM与GNSS深度融合的技术框架。通过系统分析误差来源,构建了涵盖感知、处理、融合与应用的四层协同架构,并创新性地引入BIM语义信息驱动的动态误差修正模型与多源融合定位算法。工程实践表明,该方法可将动态测量平面与高程误差分别控制在 $\pm 1.5\text{cm}$ 与 $\pm 2.0\text{cm}$ 以内,在保证高精度的同时显著提升作业效率,有效解决了城市复杂环境下GNSS定位不稳定、传统测量效率低等痛点。本研究不仅为市政道路智能施工提供了可行技术路径,也为BIM与GNSS在其他基础设施工程(如桥梁、隧道、轨道交通)中的深度集成提供了参考。未来工作将聚焦于BIM模型动态更新机制、多传感器紧耦合算法及低成本轻量化系统研发,进一步推动智能建造技术的普及与应用。

参考文献

- [1]张建平,李丁.BIM与GIS集成技术在智慧市政中的应用研究[J].测绘科学,2020,45(6):112-119.
- [2]李志刚,王伟,刘经南.城市环境下多路径误差抑制方法综述[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44(5):621-630.
- [3]Teunissen P J G, Montenbruck O. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems[M].Springer,2017.
- [4]郭忠印,李立寒.沥青路面施工质量智能监控技术研究进展[J].中国公路学报,2021,34(8):1-15.