

基于增强现实设备的地下电缆虚实融合与精确定位方法

张惠荣¹, 陈奕戈¹, 罗世彬¹, 周恩泽², 刘淑琴²

(1.广东电网有限责任公司惠州供电局, 广东 惠州 516000; 2.广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510000)

摘要:提出一种基于增强现实设备的虚实融合与精确定位方法。通过多传感器环境感知技术,构建电缆隧道三维模型及三维坐标获取,实时获取头部(设备)的方向、位置和运行状态信息。通过即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术,构建并实时更新环境地图,获取虚拟内容的位置及人机交互。通过全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)差分定位技术优化,增加SLAM系统的稳定性和准确性,提高位置定位精确度。实验结果表明,本文方法定位误差不大于10 cm且具有较好的实用性。

关键词:地下电缆;增强现实;虚实融合;激光点云;差分定位

中图分类号:TP391;TM72

文献标志码:A

引用格式:张惠荣,陈奕戈,罗世彬,等.基于增强现实设备的地下电缆虚实融合与精确定位方法[J].山东大学学报(理学版),2026,61(5):46-54,64.

Virtual-real fusion and precise positioning method for underground cables based on augmented reality devices

ZHANG Huirong¹, CHEN Yige¹, LUO Shibin¹, ZHOU Enze², LIU Shuqin²

(1. Huizhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Huizhou 516000, Guangdong, China; 2. Electric Power Science Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China)

Abstract: A virtual-real fusion and precise positioning method is proposed based on augmented reality devices. Through multi-sensor environmental perception technology, a three-dimensional model of the cable tunnel and three-dimensional coordinate acquisition are constructed, and real-time information on the direction, position, and operating status of the head (equipment) are obtained. By using simultaneous localization and mapping (SLAM) technology, real-time construction and updating of environmental maps can be achieved and obtained the location of virtual content and human-computer interaction. By optimizing the differential positioning technology of the global navigation satellite system (GNSS), the stability and accuracy of the SLAM system and the positioning accuracy are improved. The experimental result is shown that the positioning error of the proposed method described in the article does not exceed 10 cm, indicating good practicality.

Key words: underground cables; augmented reality; virtual real fusion; laser point cloud; differential positioning

0 引言

随着城市化进程的加快,地下电缆线路规模不断增加,相对于架空线路,城市高压电缆多敷设在地下,管线错综复杂,运维难度大,常规的日常巡视多依托人工方式,由于运维人员技术水平和经验因人而异,错看、漏看等问题时常发生,巡视工作量及其成本居高不下^[1],而增强现实(augmented reality, AR)技术为电缆线路日常巡视提供数字化作业设备,实现历史缺陷隐患的识别比对,辅助运维人员完成电缆巡视工作的全过程闭环,保障电缆线路运检工作质量,提高日常巡视工作效率^[2]。

现有电缆线路定位技术主要包括电磁定位、地质雷达、磁力定位和接地电阻法等技术^[3]。文献[4]提出电磁定位技术的优点是定位范围大,能检测到深度较浅的电缆,同时能够检测金属和非金属电缆。但该方法

的缺点是受到外界环境的影响较大,如周围的金属结构物、水泥地面等对定位结果会产生干扰。文献[5]利用地质雷达技术探测到非金属电缆,但缺点是价格较高,且要专业人员进行操作。文献[6]利用磁力定位技术探测到金属电缆,且精确度较高,但缺点是受到地磁场的影响较大,在深度较深的地方定位精确度也会降低。文献[7]提出接地电阻法技术虽然成本较低,且对环境的要求相对较低,但是只能探测到金属电缆,且定位精确度不高。文献[8]提出超宽带(ultra wide band, UWB)+行人航位推算(pedestrian dead reckoning, PDR)混合定位技术,虽然能提升隧道内定位精确度,但须预埋大量基站,部署成本高昂且灵活性不足。文献[9]研究表明,现有AR辅助巡检系统在低纹理环境中的虚实配准误差大于15 cm,难以满足电缆精确定位需求。

综合现有研究,当前地下电缆定位技术存在3大不足:(1)单一技术局限性显著,电磁/磁力法易受环境干扰,地质雷达成本高,全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)地下信号弱;(2)混合方案实施复杂,如UWB基站部署依赖基础设施,难以动态适配复杂隧道;(3)虚实融合精确度不足,现有AR系统因即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术存在漂移和坐标映射偏差,导致虚拟模型叠加误差较大。针对上述不足,本文基于AR设备提出地下电缆虚实融合与精确定位方法。该方法采用多传感器环境感知技术,通过AR设备配备深度摄像头,实时获取环境信息并构建深度图像,通过配备惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU),测量AR设备位置、方向和运动状态,实现头部和设备的位置追踪;采用SLAM技术,将深度图像和传感器数据结合,用于AR设备中感知虚拟环境中物体、遮挡物和表面特征的位置获取及交互;采用差分定位技术,通过实时动态载波相位差分技术(real-time kinematic, RTK)设备接收基准站的GNSS数据,采用优化算法提高位置精确度。

1 主要原理及研究内容

1.1 总体思路

本文方法主要涉及SLAM、GNSS系统:(1)基于SLAM系统,通过AR设备环境感知技术,同时配备IMU,实现AR设备的位置、方位和运动状态的测量,从而实现头部和设备的位置追踪,并通过SLAM技术,将深度图像和传感器数据结合,构建现实世界的三维模型,实现虚拟内容的正确位置的交互;(2)传统的GNSS定位技术,主要通过巡检人员佩戴AR设备作为移动站接收卫星原始信号与基准站校正数据,实现地面上实时位置计算。但由于存在着卫星星历、时钟误差、大气折射误差等因素,导致较大误差。本文将SLAM与GNSS进行融合,SLAM相当于提供离线地图+位姿感知功能,GNSS获取实时定位后提供在虚实世界中导航功能,技术原理图如图1所示。

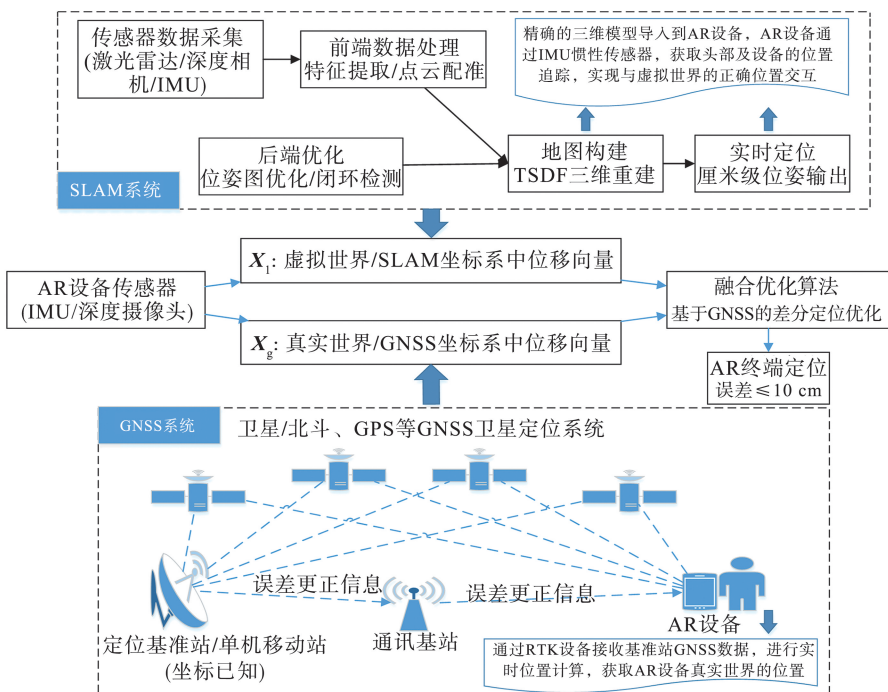


图1 GNSS与SLAM融合技术原理图

Fig.1 Schematic diagram of GNSS-SLAM fusion technology

在 SLAM 系统中,电缆设备在覆土前,工作人员可通过激光扫描仪完成点云扫描,并采用截断符号距离函数(truncated signed distance function, TSDF)进行三维重建和地图构建,记录设备坐标信息^[10]。精细化建模后,将三维模型导入 AR 设备,通过 AR 设备中集成的 IMU 等传感器,可获取头部(AR 设备)在 SLAM 坐标系中的位移向量 X_1 ;通过 GNSS 差分定位法实时计算获取在 GNSS 坐标系中的位移向量 X_g ;最后,基于融合优化算法,实时刷新位置及偏转角度,使得工作人员具备高精度在虚实世界中位置同步及互动作业可能。北斗及全球定位系统(global positioning system, GPS),结合 GNSS 技术在本项研究中并非直接用于地下无信号区的定位,而是通过在地表或隧道口等有信号覆盖区域提供厘米级高精度的绝对位置基准。该基准信息被深度融合到 SLAM 后端优化框架中。

1.2 多传感器环境感知融合

为突破传统单一传感器在复杂地下环境中的感知瓶颈,本文提出多模态传感器协同标定与融合机制,各传感器参数与功能如表 1 所示。通过激光点云与建筑信息模型(building information modeling, BIM)模型动态对齐、深度传感-IMU 紧耦合感知架构,实现高精度环境建模与虚实融合定位。

表 1 多传感器环境感知参数

Table 1 Parameters of multi-sensor environmental perception

传感器类型	采集数据	精确度	采样频率	数据类型	作用
深度传感器	1 024×1 024 深度图	±0.02(0.5~5.5)m	30 Hz	16 bit 深度数据	实时构建厘米级点云
IMU 单元	三轴加速度、三轴角速度	加速度±0.01 g,角速度±0.5 (°)/s	100 Hz	float 型运动矢量	捕获六维度位姿变化,补偿视觉跟踪
摄像头	3 264×2 448 像素		30 Hz	8 bit 图像	提供视觉特征辅助 SLAM
激光扫描仪	三维点云	±0.001 m	97.6 万点/s	浮点坐标(x,y,z)	构建高精度隧道 BIM 模型

1.2.1 激光点云与 BIM 模型动态对齐

针对传统点云拼接易受地形复杂性和低密度区域影响,提出基于法向量约束的改进迭代最近点(iterative closest point, ICP)算法,实现毫米级配准的精确度。具体实现如下:

(1) 模型框架构建。基于施工图纸与 BIM 模型建立电缆隧道三维框架,将管廊拐点、交叉管线节点等作为关键特征点进行预定义,为点云配准提供先验约束^[11];

(2) 法向量约束配准。在传统 ICP 算法中引入法向量约束,使投影误差最小,优化点云匹配权重,降低传统方法的配置残差,消除弯道区域因点云密度不足导致的拼接畸变。误差函数为

$$E(T_p) = \sum \| (T_p V_p(u) - V_{p-1}(\hat{u})) n_{p-1}(\hat{u}) \|^2, \quad (1)$$

式中: T_p 是第 p 帧时相机在世界坐标系下的位姿矩阵, T_p 是优化求解的对象, $V_p(u)$ 是第 p 帧深度图上像素 u 反投影出的三维坐标, $V_{p-1}(\hat{u})$ 是第 $p-1$ 帧深度图上对应像素 \hat{u} 反投影出的三维坐标, $n_{p-1}(\hat{u})$ 是第 $p-1$ 帧深度图上对应像素 \hat{u} 的法向量。

(3) 动态纹理映射。将配准后的点云与 BIM 模型融合,叠加色彩与反射强度信息,生成高保真三维模型,支持 AR 设备中虚实场景的毫米级空间对齐^[12]。

1.2.2 深度传感-IMU 感知融合架构

IMU 是一种集成了加速度计和陀螺仪的三轴传感器,实现设备实时运动状态检测。如图 2 所示,加速度计检测设备在三维空间中 X、Y 和 Z 轴的线性加速度和运动方向;陀螺仪检测设备绕三轴横滚角、俯仰角和偏航角的角速度。将三轴加速度计与陀螺仪的数据进行融合,输出六自由度位姿变化量,以 100 Hz 高频更新补偿视觉跟踪缺失,达到抑制 SLAM 漂移的效果。

为进一步解决低纹理区域 SLAM 定位漂移问题,本文提出深度传感-IMU 单元紧耦合感知融合架构,如图 3 所示。首先通过深度传感器,如微软推出的空间计算工具套件 Azure Kinect DK,实时获取厘米级精度点云数据(±2 cm),构建局部环境 TSDF 模型。利

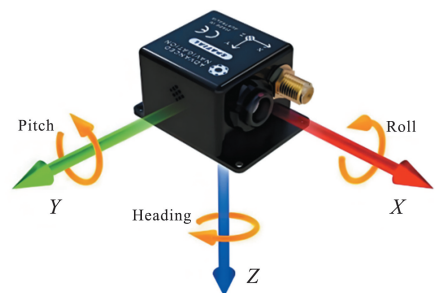


图 2 IMU 原理示意图
Fig.2 Schematic diagram of inertial sensor

用 IMU 单元集成加速度计、陀螺仪等进行六轴惯性测量,实时解算设备位姿^[13-14]。通过卡尔曼滤波动态修正深度传感器因光照变化或运动模糊导致的瞬时误差,对 IMU 数据进行数据补偿,对姿态角积分误差进行修正和零偏校准^[15]。根据环境特征密度动态调整融合权重,融合后的位姿估计为

$$W_{\text{fusion}} = \alpha D_{\text{normalized}} + \beta I_{\text{compensated}}, \quad (2)$$

式中: α 为深度传感器的动态权重系数, β 为 IMU 的动态权重系数, $D_{\text{normalized}}$ 为归一化的深度传感器数据; $I_{\text{compensated}}$ 为补偿后的 IMU 数据。

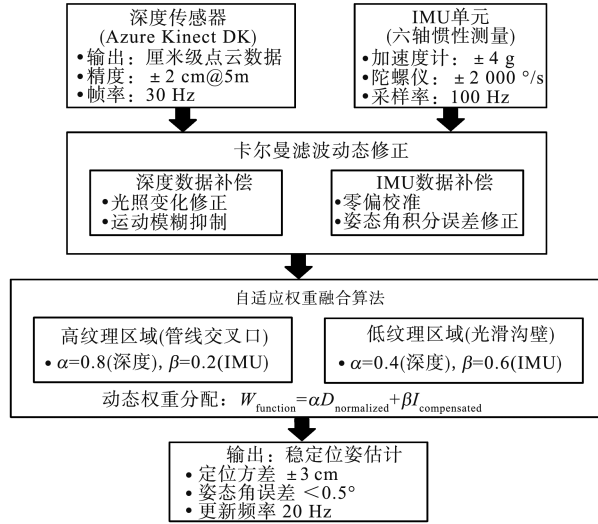


图 3 深度传感-IMU 单元感知融合架构图

Fig.3 Deep sensing-IMU unit perception fusion architecture diagram

融合过程中,本研究提出对高纹理区域(如管线交叉口)和低纹理区域(如沟壁)采用自适应权重融合算法进行处理;对高纹理区域,以深度传感器为主、IMU 为辅,为抑制 IMU 积分漂移,将深度传感器和 IMU 的权重设置为 $\alpha=0.8$ 、 $\beta=0.2$;对低纹理区域,则以 IMU 为主,为解决 SLAM 特征缺失问题,将权重调整为 $\alpha=0.4$ 、 $\beta=0.6$ 。通过上述处理,最后输出稳定位姿估计。

1.3 SLAM 实时定位与地图构建

针对地下电缆隧道低纹理、动态环境复杂等问题,本文提出分层优化的 SLAM 实时定位与地图构建方法,融合点对面 ICP 和 TSDF 联合优化、图形处理器 (graphic processing unit, GPU) 加速三维重建与通用坐标转换模型,提高定位精确度与系统实时性^[16]。

1.3.1 点对面 ICP 和 TSDF 联合优化

传统 ICP 算法依赖点对点欧氏距离最小化,在低纹理场景易受匹配歧义影响。本文提出如下改进:采用式(1)构建法向量约束误差模型,通过最小化点到平面垂直距离计算,提高位姿估计精确度;对于分辨率为 256×256 的降采样点云,采用粗配准以快速估算初始位姿,对于分辨率为 $1\ 024 \times 1\ 024$ 的原始点云与法向量约束,采用精配准以优化后残差收敛阈值^[17];最后,采用 TSDF 加权融合方法,实现动态多帧 TSDF 数据融合,较传统方法降低表面重建误差^[18]。融合后新的截断函数为

$$T_{\text{new}}(v) = \frac{T_{\text{old}}(v)W_{\text{old}}(v) + T_{\text{current}}(v)W(v)}{W_{\text{old}}(v) + W(v)}, \quad (3)$$

式中: $W_{\text{old}}(v)$ 和 $W(v)$ 为前一帧和当前帧的权重, $T_{\text{old}}(v)$ 和 $T_{\text{current}}(v)$ 为前一帧和当前帧的截断函数值。根据权重 $W_{\text{old}}(v)$ 、 $W(v)$ 推导出后续帧的权重为

$$W_{\text{new}}(v) = W_{\text{old}}(v) + W(v). \quad (4)$$

1.3.2 GPU 加速三维重建

为解决大规模点云实时重建难题,设计以下优化方案:

(1)三层金字塔降采样。通过均值降采样,构建三层金字塔结构,支持从粗到精的位姿优化。主要原理为合并相邻像素深度值,实现分层压缩,保留主要结构的同时降低数据量。降采样生成的下一层深度图为

$$D_k^{(l+1)}(u', v') = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 D_k^{(l)}(2u'+i, 2v'+j), \quad (5)$$

式中: $D_k^{(l)}$ 是第 l 层深度图($l=0$ 为原始层), l 为金字塔的层级, $l=0$ 为原始层, 具有最高分辨率, $l=1, 2, \dots, N$, $N \in \mathbf{N}$ 表示降采样后的层级, (u', v') 是降采样后图像中的像素坐标, i, j 用于遍历相邻像素的索引, 分别为 0 或 1。

构建的金字塔结构分为 3 层: 顶层-level 0, 保留完整细节和原始分辨率, 如 1024×1024 ; 中间层-level 1, 分辨率为 512×512 , 用于粗配准初始化; 底层-level 2, 分辨率为 256×256 , 用于加速 ICP 算法。

(2) GPU 并行加速。TSDF 更新与 Marching Cubes 表面提取由传统 CPU 处理改造移植至 GPU 处理, 可实现并行加速, 提高重建帧率, 支持 AR 设备实时渲染, 满足巡检动态场景需求。

1.3.3 通用坐标转换模型

为实现多源数据无缝对齐, 提出通用矩阵变换模型, 可实现不同坐标系之间转换, 模型转换公式为

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c & m \\ e & f & g & n \\ i & j & k & o \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中: (x_1, y_1, z_1) 是原始坐标系中的点坐标, (x_2, y_2, z_2) 是转换后的坐标系中的点坐标, 矩阵中的元素 $a, b, c, e, f, g, i, j, k$ 表示旋转和缩放操作, m, n, o 表示平移操作。

通过坐标转换, 实现了不同坐标系之间的无缝转换, 确保虚拟模型准确地叠加到现实场景中^[19]。矩阵变换模型能够灵活地处理平移、旋转、缩放和投影等操作, 为 SLAM 系统精确定位和地图构建提供坚实的基础。本文利用通用矩阵变换模型, 集成地理坐标系 GNSS、SLAM 局部坐标系与 BIM 模型坐标系, 降低定位偏差, 实现多源数据无缝对齐, 为 SLAM 局部坐标映射至 GNSS 世界坐标系提供了实现方案。

1.4 GNSS-SLAM 差分定位融合优化

针对地下电缆隧道复杂环境中 GNSS 信号易受多路径效应干扰及 SLAM 长期运行累积误差的问题, 提出双阈值动态校正算法与 RTK-GNSS 增强策略, 有利于提高 GNSS 绝对定位精确度与 SLAM 系统的鲁棒性^[20]。

1.4.1 双阈值动态校正算法

传统 GNSS 差分定位在某些区域, 如隧道入口等半开阔区域易受信号波动影响, 本文通过以下方法实现 SLAM 与 GNSS 的动态融合。

首先, 需对原始视觉数据进行初始化处理, 包括去除噪声和异常值处理、初始关键帧和距离当前帧最近的关键帧选择和旋转矩阵 R_{gl} 计算等步骤, 消除视觉数据存在的尺度和方向不准确因素; 其次, 通过迭代最小二乘法, 对视觉数据的准确尺度进行恢复。采用比例因子 k 表示 GNSS 坐标系与 SLAM 坐标系之间的尺度差异, 即

$$k = \frac{\|x_g\|}{\|x_l\|}, \quad (7)$$

式中: x_g 是 GNSS 坐标系中的位移向量, x_l 是 SLAM 坐标系中的位移向量。

初始化后, 需设置阈值对视觉数据是否存在偏差进行评估, 判断是否需要使用 GNSS 对数据进一步优化。判断指数 s 用于衡量 GNSS 数据与 SLAM 数据的对齐程度, 即

$$s = \frac{\|x_g - kR_{gl}x_l\|}{\|x_g\|}, \quad (8)$$

式中: R_{gl} 是从 SLAM 坐标系到 GNSS 坐标系的旋转矩阵。如果 s 超过预设阈值, 则使用 GNSS 数据对 SLAM 系统进行校正, 更新相机点和地标点的位置。

经过上述优化过程, 实现 GNSS 数据与 SLAM 系统的融合, 得到更精确的经纬度坐标。

1.4.2 RTK-GNSS 增强 SLAM 稳定性

为解决弯道区域 SLAM 特征稀疏导致的定位抖动问题, 提高 SLAM 的持续稳定性和鲁棒性, 提出动态融合机制和基准站-移动站协同标定策略^[21]。

首先,SLAM 系统输出相对位姿,以及 RTK-GNSS 提供绝对位置后,通过扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)将上述两类数据进行融合,更新位姿估计为

$$\hat{X} = X_{\text{SLAM}} + K_r (P_g - H X_{\text{SLAM}}), \quad (9)$$

式中: X_{SLAM} 是通过点云匹配与 TSDF 重建输出的位姿,未融合 GNSS 数据; K_r 为卡尔曼增益矩阵,用于动态调整 GNSS 数据对状态更新的权重,由预测协方差与测量噪声计算得到; P_g 为 RTK-GNSS 设备输出的地理坐标; H 为观测矩阵,将 SLAM 状态空间映射到 GNSS 测量空间,若 GNSS 仅提供位置, H 提取位置分量。

融合后得到的 \hat{X} 为最优位姿估计,综合了 SLAM 局部精确度与 GNSS 绝对位置优势。

然后,采用基准站-移动站进行协同标定。在电缆隧道布设后、覆土前,沿着电缆隧道沿路地面上每 500 m 布设基准站,实时广播差分校正数据,工作人员佩戴 AR 头戴设备及 RTK 设备进行作业,RTK 设备作为移动站与基准站进行协同标定。

通过上述处理,当 GNSS 信号受多路径效应干扰时,通过动态调整 K 将异常值进行抑制,绝对定位误差得以减少。实际应用中,将三维模型导入 AR 设备,提前将模型中的经纬度作为定位点,并通过 RTK 设备实时获取当前的经纬度信息,在 AR 设备内接收到 RTK 的定位数据,并根据模型定位点与 RTK 测量的经纬度进行优化计算,最终实现虚拟模型和现实模型的融合和精确定位,满足地下电缆巡视的高精确度需求。

2 实例测试

为验证本文方法有效性,在某市 110 kV 地下电缆隧道工程中开展实测研究,结合多维度对比实验与误差分解分析,验证本文所述方法在定位精确度、虚实对齐稳定性及系统实时性等方面的优势。

2.1 实验环境及配置

实验选取电缆工程长度 300 m,包含直线段 200 m,弯道 80 m 及交叉管线密集区 20 m,低纹理沟壁占比 60%。

实验所涉及的设备包括集成了多传感器的 AR 头戴设备、激光扫描仪、RTK-GNSS 及全站仪等设备。AR 头戴设备采用 Microsoft HoloLens 2,搭载高通骁龙 850 处理器,并集成以下传感器模块:(1)深度传感器 Azure Kinect DK,分辨率 1 024×1 024,深度感知范围 0.5~5.5 m,精确度±2 cm;(2)内置六轴惯性传感器(三轴加速度计+三轴陀螺仪),采样频率 100 Hz;(3)内置八百万像素高清摄像头,用于 SLAM 视觉特征提取,激光扫描仪采用 FARO Focus S 350,扫描速率 97.6 万点/s,测距精确度±1 mm,用于构建电缆隧道三维点云模型,RTK-GNSS 设备采用华测导航 i70,支持北斗三代与 GPS 双频定位,水平定位精确度±(8+0.001)mm、垂直定位精确度±(15+0.001)mm。全站仪采用 Leica TS16 作为基准测量工具,测角精确度 1",测距精确度±1 mm。

实验过程中,对 SLAM 算法参数及 GNSS 差分定位参数进行设置:SLAM 算法参数方面,ICP 迭代次数设为 50 次/帧,收敛阈值 0.001 m,TSDF 体素分辨率 5 cm,截断距离±15 cm,地图更新频率 10 Hz;GNSS 差分定位参数方面,基准站布设间距设为 500 m,数据回传延迟≤50 ms,初始化收敛条件为位置标准差<5 cm、姿态角标准差<0.5°。

为验证本文方法的先进性,实验选取 2 个方法作为基准方法与本文方法进行精确度及性能方面对比:基准方法 1 为传统点对点 ICP+ 单目 SLAM,采用 ICP 算法进行点云配准,结合单目摄像头提取 ORB 特征点构建稀疏地图,并实现位姿态求解。该方法没有融合 IMU,存在低纹理场景特征点缺失导致位姿漂移,弯道区域配准误差较大等不足^[22];基准方法 2 为纯 GNSS 差分定位,采用 RTK-GNSS 移动站接收基准站差分信号,并通过载波相位观测值对绝对地理坐标进行求解。该方法在隧道内会由于多路径效应导致信号中断,半开阔区存在定位抖动方差等问题^[23]。

2.2 实验方法及结果分析

通过多组对比实验,分别验证定位精确度、虚实对齐稳定性及系统实时性。

定位精确度实验包含电缆走向匹配测试和沟壁与管线经距测试 2 个维度。电缆走向匹配测试方面,测试人员使用全站仪沿电缆路径每 10 m 设置基准点,采集并记录各基准点的三维坐标作为基准数据;佩戴 AR 设备沿预设路径行走,系统实时记录虚拟管线坐标。对比 AR 设备输出坐标与全站仪基准点坐标,记录并

计算最大偏差与平均偏差。测试效果如图 4 所示。



图 4 电缆走向匹配测试结果图

Fig.4 Cable routing matching test result chart

本文所述方法平均偏差为 4.2 cm,在弯道区域最大偏差 8 cm;基准方法 1 平均偏差为 12 cm;基准方法 2 由于存在 GNSS 信号易受多路径效应干扰,导致平均偏差为 20 cm,在信号中断区域误差 >50 cm。实测情况可知,本文所述方法基于法向量约束 ICP 有效降低了匹配误差,GNSS-SLAM 融合优化方法保障了绝对定位鲁棒性。

沟壁与管线经距测试方面,测试人员在电缆设备覆土前使用钢尺测量沟壁与管线水平间距,采集并记录 20 组实测值。测试过程中,在 AR 设备中调用 BIM 模型,提取相同位置间距数据。记录并计算相对误差率。由于该项测试不涉及基准方法 2,故仅与基准方法 1 进行对比。测试效果如图 5 所示,表 2 为测试结果。



(a) 沟壁测试

(b) 管线经距测试

图 5 沟壁与管线经距测试

Fig.5 Distance test results between ditch wall and pipeline test result chart

表 2 沟壁与管线经距测试结果

Table 2 Results of distance testing between ditch wall and pipeline

方法	最近沟壁距离/cm	交叉管线水平间距/cm	相对误差率/%
本文方法	±3	±1	62.5
基准方法 1	±8	±5	80

测试情况可见,本文所述方法采用法向量约束 ICP 算法,有效降低点云配准误差和弯道区域最大偏差,同时,GNSS-SLAM 融合优化算法有效抑制 SLAM 绝对定位漂移,提高精确度。

虚实对齐稳定性实验围绕多坐标系对齐测试和低纹理区域稳定性测试开展。多坐标系对齐测试过程中,测试人员在 BIM 模型中预置 10 个定位锚点,并与全站仪测量坐标对齐。携带 AR 设备并移动到不同位置,实时记录 SLAM 局部坐标与 GNSS 地理坐标的转换偏差,在弯道区域连续采集 100 帧位姿数据,计算每一帧的转换偏差,统计标准差以衡量算法的稳定性,并与基准方法进行对比。由于基准方法 2 仅依赖 GNSS 绝对位置,不涉及坐标系映射,故未参与该项测试对比。测试结果如下:本文方法经统计计算所得的标准差 ≤ 3 cm,而基准方法 1 的标准差为 10~15 cm。说明基准方法 1 由于未引入动态坐标转换模型,导致对齐偏差明显大于本文方法。

低纹理区域稳定性测试过程中,测试人员以 20 m 为 1 段,选取 5 段光滑沟壁区域。标记虚拟管线位置,系统记录成功叠加次数,判定标准为偏差 <5 cm。连续运行 1 h,统计 SLAM 位姿漂移量。统计并计算虚拟管线模型叠加到真实场景中且位置偏差小于 5 cm 的次数占总次数的百分比,记为虚拟管线叠加成功率。在该时段内,记录并计算自身位姿(位置和姿态)的累积误差与所经过路径总长度的比值,记为 SLAM 漂移率。测试结果如表 3 所示。

由表 3 可以看出,本文所述方法较基准方法 1,由于采用了自适应权重融合算法,将虚拟管线叠成功率提升了 21.8%,SLAM 漂移率提升了 80%。

系统实时性实验通过重建帧率对比进行验证。首先使用激光扫描仪按照 200 点/m² 采集并获取电缆隧道点云数据;分别通过传统 CPU 和 GUP 进行

处理,统计并对比每秒完成的 TSDF 更新与表面提取的帧数。测试结果为:传统 CPU 处理所得的重建帧率为 5 Hz,采用本文所述 GPU 加速处理后,提升至 20 Hz;配准延迟由 120 ms 降至 30 ms,满足 AR 设备工程实用性渲染需求。

2.3 综合性能对比

整合上述实验结果,横向对比本文方法与基准方法的综合性能,对比情况如表 4 所示。

表 4 综合性能对比
Table 4 Comparisons of comprehensive performance

方法	绝对定位误差/cm	相对定位误差/cm	虚实对齐偏差/cm	重建实时性/Hz	低纹理叠成功率/%
基准方法 1	不适用	±8	10~15	5	78%
基准方法 2	20~50	不适用	不适用	不适用	不适用
本文方法	≤10	±3	≤3	20	95%

低纹理叠成功率的计算方法为:在低纹理环境中,系统将虚拟模型(如管线)叠加到真实场景中且位置偏差小于 5 cm 的次数占总尝试次数的百分比。

对比分析情况可知:绝对定位误差方面,本文方法较基准方法 2 提高 80%;相对定位误差方面,较基准方法 1 提高 62.5%;虚实对齐偏差方面,较基准方法 1 降低 70%;重建实时性和方面低纹理叠成功率,较基准方法 1 分别提高 300%和 21.8%。

3 结论

基于 AR 设备,通过应用多传感器协同感知、基于 SLAM 技术的分层优化架构、GNSS-SLAM 差分融合优化等创新技术,实现了虚实世界的无缝叠加、实时位置的精确获取和虚实世界的稳定融合。

(1) 多传感器协同感知方面,本文提出激光点云与 BIM 动态对齐技术,基于法向量约束 ICP 实现毫米级配准,并结合深度传感-IMU 紧耦合模型和自适应调整传感器权重算法,抑制了 SLAM 漂移,显著提升了低纹理场景鲁棒性;(2) 设计基于 SLAM 技术的分层优化架构,融合点对点 ICP 与 TSDF 加权重建,通过法向量投影误差最小化,提高了位姿估计精确度,并通过设计 GPU 加速三维重建框架,提高传统 CPU 处理的 TSDF 更新速度,满足 AR 设备实时交互需求;(3) 本文提出 GNSS-SLAM 差分融合优化方法,采用双阈值动态校正算法,消除 SLAM 尺度漂移,并通过 RTK-GNSS 实时修正位姿,有效减少弯道区域定位抖动方差和绝对定位误差。在 300 m 电缆隧道测试中,实现虚实对齐偏差≤3 cm,较基准方法降低 70%;低纹理叠成功率 95%,较基准方法提升 21.8%;重建帧率由 5 Hz 提升至 20 Hz。实验结果表明,本文研究成果与传统方法相比,具备较好的定位精确度、虚实对齐稳定性及系统实时性上的显著优势,为城市电缆智能化巡检提供了高精度、高质量的解决方案。

参考文献:

[1] 王育红. 城市地下综合管廊监测与预警系统研究及应用[D]. 西安:西安建筑科技大学,2017.
WANG Yuhong. Research and application of urban underground utility tunnel monitoring and warning system[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.

[2] 王超,史江凌,王朝凤,等. 基于 AR 眼镜的地下线缆透视式巡检技术研究[J]. 电力系统装备,2019(16):224-226.
WANG Chao, SHI Jiangling, WANG Chaofeng, et al. Research on perspective inspection technology of underground cable based on ar glasses [J]. Electric Power System Equipment, 2019(16):224-226.

[3] 程晓宇. BIM 技术在地下综合管廊工程中的应用研究[D]. 太原:太原理工大学,2021.

- CHENG Xiaoyu. Research on the application of BIM technology in the project of underground integrated pipe gallery [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [4] 柏东辉,吴建杰. 基于 GPS 差分定位的变电站电磁干扰位置识别[J]. 电子设计工程,2024,32(20):40-43.
BAI Donghui, WU Jianjie. Identification of EMI location in substation based on GPS differential positioning [J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(20):40-43.
- [5] 广东电网有限责任公司,广东电网有限责任公司河源供电局. 一种电缆的定位方法、装置、计算机设备和存储介质: CN202110127278.5 [P]. 2021-05-28.
Guangdong Power Grid Corporation, Heyuan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Corporation. A cable positioning method, device, computer equipment, and storage medium; CN202110127278.5 [P]. 2021-05-28.
- [6] 国网河北省电力有限公司石家庄供电分公司,国家电网有限公司,石家庄铁道大学. 一种基于 PDR、UWB 和地图匹配的电缆隧道定位方法: CN202311690350.0 [P]. 2024-04-12.
State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang Power Supply Branch, State Grid Corporation of China, Shijiazhuang Railway University. A cable tunnel positioning method based on PDR, UWB, and map matching; CN202311690350.0 [P]. 2024-04-12.
- [7] 张煜,张寒,王晓东,等. 基于电阻法的智能型电缆故障自动定位装置的研发[J]. 电工技术,2023(12):98-100.
ZHANG Yu, ZHANG Han, WANG Xiaodong, et al. Research and development of intelligent automatic cable fault location device based on resistance method [J]. Electric Engineering, 2023(12):98-100.
- [8] 张旭鹏. “UWB+PDR”联合支持下的井下定位系统研究[J]. 自动化应用,2025,66(8):99-102.
ZHANG Xupeng. Research on underground positioning system jointly supported by "UWB + PDR" [J]. Automation Application, 2025, 66(8):99-102.
- [9] 彭政,尹自力,陈紫琦. 基于 BIM+AR 技术的智慧变电运行辅助巡检系统优化方法研究[J]. 电工材料,2023(2):4-6.
PENG Zheng, YIN Zili, CHEN Ziqi. Research on optimization methods of smart substation operation auxiliary inspection system Based on BIM+AR technology [J]. Electrical Engineering Materials, 2023(2):4-6.
- [10] 邵斌,郭利强,贺杰,等. 矿用脉冲激光测距系统研究[J]. 自动化仪表,2023,44(2):17-20.
SHAO Bin, GUO Liqiang, HE Jie, et al. Research on mining pulsed laser distance measurement system [J]. Process Automation Instrumentation, 2023, 44(2):17-20.
- [11] 王凯,刘鹏飞. 城市级地下管网 BIM 建设及应用[J]. 测绘通报,2022(11):132-134.
WANG Kai, LIU Pengfei. BIM construction and application of urban underground pipe network [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(11):132-134.
- [12] 高雅真. 面向高分辨率激光扫描点云的图像色彩界面交互配色设计研究[J]. 激光杂志,2024,45(8):159-163.
GAO Yazhen. Research on interactive color matching design of image color interface for high resolution laser scanning point cloud [J]. Laser Journal, 2024, 45(8):159-163.
- [13] 李杰,高树功,雷东. 基于 AR 的变电站设备实体信息获取流程优化系统[J]. 现代电子技术,2022,45(2):129-134.
LI Jie, GAO Shugong, LEI Dong. AR-based process optimization system for substation equipment entity information acquisition [J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(2):129-134.
- [14] 袁鹏程,何健安. 基于深度传感器的监控技术与算法[J]. 传感器与微系统,2019,38(3):134-136.
YUAN Pengcheng, HE Jianan. Monitoring technology and algorithm based on depth sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(3):134-136.
- [15] 周霆威,乔贵方,刘娣,等. 基于 IMU 在线校准的 SLAM 精度提升方法研究[J]. 仪表技术与传感器,2024(3):1-5.
ZHOU Tingwei, QIAO Guifang, LIU Di, et al. Research on improving accuracy of SLAM based on IMU online calibration [J]. Instrument Technique and Sensor, 2024(3):1-5.
- [16] 王智敏,陶宝林,于鹏,等. 基于可穿戴式惯性测量单元的行人室内定位技术[J]. 传感器与微系统,2021,40(1):46-48.
WANG Zhimin, TAO Baolin, YU Peng, et al. Indoor positioning technology of pedestrian based on wearable IMU [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(1):46-48.
- [17] 王嘉琛,叶周润,欧鑫,等. 基于 GPU 的并行 ICP 点云配准算法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(11):1501-1505.
WANG Jiachen, YE Zhouren, OU Xin, et al. Research on GPU based parallel ICP point cloud registration algorithm [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2023, 46(11):1501-1505.

- [7] FORGY E W. Cluster analysis of multivariate data: efficiency versus interpretability of classifications[J]. *Biometrics*, 1965, 21(3):768-769.
- [8] LLOYD S. Least square quantization in PCM[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1982, 28(2):129-137.
- [9] JOHNSON S. Hierarchical clustering schemes[J]. *Psychometrika*, 1967, 32(3):241-254.
- [10] HARDING E F. The number of partitions of a set of n points in k dimensions induced by hyperplanes[J]. *Proceedings of the Edinburgh Mathematical Society*, 1967, 15(4):285-289.
- [11] JARDINE N, SIBSON R. The construction of hierarchic and non-hierarchic classifications[J]. *The Computer Journal*, 1968, 11(2):117-184.
- [12] HARTIGAN J A. Clustering algorithms[M]. Toronto: Wiley, 1975.
- [13] ESTER M, KRIEGEL H P, SANDER J, et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise[C] // *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Oregon: AAAI, 1996.
- [14] 周志华. 机器学习[M]. 北京:清华大学出版社, 2016.
ZHOU Zhihua. Machine learning[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
- [15] ENGELKING R. General topology[M]. Berlin: Heldermann Verlag, 1989.
- [16] HU Wanjun. Typed topology and its application to data sets[J]. *Topology and Its Applications*, 2024, 342:108760.
- [17] MA Liwen. Important matrix computations in finite topological spaces[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2021, 395:125808.

(编辑:陈丽萍)

(上接第 54 页)

- [18] 李翔宇,张雪芹. ORBTSDF-SCNet:一种动态场景在线三维重建方法[J]. *华东理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 49(2):284-294.
LI Xiangyu, ZHANG Xueqin. ORBTSDF-SCNet: an online 3D reconstruction method for dynamic scene[J]. *Journal of East China University of Science and Technology*, 2023, 49(2):284-294.
- [19] 史西兵,赵政文. 移动物联网负载终端坐标动态转换算法[J]. *计算机仿真*, 2021, 38(1):247-250.
SHI Xibing, ZHAO Zhengwen. Dynamic coordinate transformation algorithm of mobile internet of things load terminal[J]. *Computer Simulation*, 2021, 38(1):247-250.
- [20] 田野,陈宏巍,王法胜,等. 室内移动机器人的 SLAM 算法综述[J]. *计算机科学*, 2021, 48(9):223-234.
TIAN Ye, CHEN Hongwei, WANG Fasheng, et al. Overview of SLAM algorithm for mobile robots[J]. *Computer Science*, 2021, 48(9):223-234.
- [21] 程保喜. GNSS 与惯性导航组合系统在复杂环境下的定位研究[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(1):89-96.
CHENG Baoxi. Research on positioning of GNSS and inertial navigation integrated system in complex environment [J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2021, 42(1):89-96.
- [22] 李帅鑫,李广云,周阳林,等. 改进的单目视觉实时定位与测图方法[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(11):2849-2857.
LI Shuaxin, LI Guangyun, ZHOU Yanglin, et al. Improved monocular simultaneous localization and mapping solution[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(11):2849-2857.
- [23] 祝会忠,范佳宝,李军. 低成本 GNSS 终端的抗差 RTK 定位性能研究[J]. *测绘科学*, 2023, 48(12):1-9.
ZHU Huizhong, FAN Jiabao, LI Jun. Research on the positioning performance of robust RTK low-cost GNSS terminals [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2023, 48(12):1-9.

(编辑:陈丽萍)