

基于 VSLAM 的三维 γ 剂量率场 快速测量方法研究

李会^{1,2,3}, 樊清¹, 李华^{1,2,3,*}, 刘立业^{1,2,3}, 陈法国^{1,2,3}, 李德源¹, 赵原^{1,2,3}

(1. 中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006; 2. 辐射安全与防护山西省重点实验室, 山西 太原 030006;
3. 山西省科技创新智能辐射测绘技术团队, 山西 太原 030006)

摘要: 针对核设施现场及数字化辐射防护系统对 γ 辐射场信息快速获取的需求, 本文采用实时定位与地图构建技术 (SLAM) 结合 γ 剂量探测技术, 解决室内场景高效测量 γ 剂量率辐射场并与数字化系统兼容的问题。根据场景传感器的特点, 基于三色深度图像 (红、绿、蓝色和深度, RGBD) 相机研究视觉 SLAM (VSLAM) 算法和辐射测量数据同步与定位方法; 建立了一套基于 VSLAM 的 γ 剂量率测量装置, 测试了场景点云质量、轨迹定位精度和 γ 剂量率模块性能; 选择某核设施现场进行实验, 分析了测量效率、定位准确性和数字化系统兼容能力。结果表明, 建立的 VSLAM γ 剂量率测量方法及相应装置, 测量效率高、定位准确, 且现场应用良好、数字化系统兼容, 具有较广阔的应用前景。

关键词: 视觉 SLAM; γ 剂量率; 三维辐射场测绘; 数字化系统

中图分类号: TL72

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2024)S1-0157-10

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0171

Research on Automatic Measurement Method of Three-dimensional Gamma Dose Rate Radiation Field Based on VSLAM

LI Hui^{1,2,3}, FAN Qing¹, LI Hua^{1,2,3,*}, LIU Liye^{1,2,3}, CHEN Faguo^{1,2,3}, LI Deyuan¹, ZHAO Yuan^{1,2,3}

(1. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China; 2. Shanxi Province Key Laboratory
for Radiation Safety and Protection, Taiyuan 030006, China; 3. Shanxi Province Science and Technology
Innovation Intelligent Radiation Mapping Technology Team, Taiyuan 030006, China)

Abstract: To address the need for rapid acquisition of gamma radiation field information in nuclear facility sites and digital radiation protection systems, simultaneous localization and mapping (SLAM) technology was combined with gamma dose detection technology in this paper. This combination aims to solve the problem of efficiently measuring gamma dose rate radiation fields in indoor scenarios while ensuring compatibility with digital systems. The study leverages the characteristics of scene sensors, focusing on visual SLAM (VSLAM) algorithms and methods for synchronizing and locating radiation measurement data using an RGBD camera. A gamma dose rate measurement device based on VSLAM was developed, employing an RGBD camera to capture the device motion trajectory and scene information. The gamma dose rate data was temporally and spatially matched with the trajectory test

收稿日期: 2024-03-17; 修回日期: 2024-05-22

基金项目: 中核集团“青年英才”项目; 山西省科技创新领军人才团队项目

* 通信作者: 李华

data by utilizing timestamps and the integral path midpoint method. This approach ensures precise synchronization between the spatial data from the VSLAM system and the temporal data from the gamma dose measurements. The quality of the scene point cloud, the accuracy of trajectory localization, and the performance of the gamma dose rate detection module were thoroughly tested. The measurement efficiency, localization accuracy, and compatibility with digital systems were analyzed at the experiments conducted at a nuclear facility site. The results show that more than 80% of the VSLAM scene point cloud matches the reference point cloud with a nearest neighbor distance of less than 0.2 m. This high level of accuracy in point cloud matching indicates that the VSLAM system can reliably reconstruct the 3D environment of the nuclear facility. The average matching distance between the measured trajectory and the motion capture system trajectory is 4.2 cm, with a standard deviation of 0.4 m. This demonstrates the high precision of the trajectory localization achieved by the VSLAM system. Within a dose rate range of 20 $\mu\text{Gy/h}$ to 20 mGy/h , the relative error in dose rate measurement is less than $\pm 5\%$, indicating the reliability of the gamma dose detection module. Compared to traditional measurement methods, the new method improves the measurement efficiency of radiation dose rate fields by 10 times. This significant enhancement in efficiency can greatly reduce the time and effort required for radiation monitoring in nuclear facilities. The average matching distance between the measured trajectory and traditional tracking equipment (total station) was 18 cm, further validating the accuracy of the SLAM-based approach. Integration with digital systems achieves 3D spatial interpolation of radiation fields, with a single gamma source localization error of less than 0.8 m. This integration allows for a comprehensive visualization and analysis of radiation fields, facilitating better decision-making for radiation protection and safety. The developed VSLAM gamma dose rate measurement method and corresponding device offer high measurement efficiency, accurate localization, and good compatibility with digital systems, indicating a broad application prospect in the field of nuclear safety and radiation protection.

Key words: VSLAM; γ radiation dose; 3D radiation mapping; digital systems

核设施运维、检修、退役等现场需要全面、准确和精确的放射学和地形数据,以规划和执行安全高效的运维、去污和退役项目^[1-5]。核设施数字化平台需要接近实时的现场辐射场可视化,为现场辐射水平分区、作业和应急响应方案制定提供依据与验证^[6-10]。但传统的辐射测量装备功能单一、数字化和智能化程度不足,在很大程度上依赖于劳动和管理密集型数据收集方法。此外,传统的辐射测量方法难以适应不断变化的环境,如退役或检修期间,因为关键组件拆除,实际辐射场数据每天甚至每小时都在发生动态变化,辐射防护工作人员需要付出很大的代价来跟踪辐射场的变化。现场辐射测量迫切需要能实时高效地测量辐射与地形数据,并能将二者融合的自动化辐射场测量方法来满足现场辐射防护最优化及应急响应与决策信息支持需求。

近年来,机器人与计算机视觉领域的实时定位与地图构建技术(SLAM)^[11]得到了飞速发展,如智能无人驾驶和基于无人机的电力、化工等巡检和公共安全、应急救援测绘等,为实现高效获取场景信息和辐射信息提供了解决思路。美国劳伦斯伯克利国家实验室^[12]自2015年开始开展编码 γ 相机与场景传感器融合测量研究,实现三维场景数据融合 γ 成像研究,但当时编码孔 γ 相机体积大移动不便。此后,该研究团队不断改进 γ 相机,减轻体积和重量并改用多模成像方式,形成了多款 γ 相机与激光雷达结合的辐射测绘装备^[13-15],但目前测绘装备辐射探测器和场景传感器多基于编码孔-康普顿多模 γ 相机和激光雷达,存在电子学复杂、装置成本极其昂贵、场景点云稀疏不太适合室内场景的问题。瑞士 Flyability 团队^[16]开发了 Elios-3 无人机结合辐射应用,采用室

内无人机结合激光雷达方式和 γ 剂量率仪,可实现室内复杂环境的无损检测并能实时显示辐射数据与地图绘制、实时视频数据回传。该无人机主要面向无损检测需求,仅显示辐射数据与现场场景画面。法国 Orano 核设施退役与后处理团队^[17-18]于 2017 年基于深度相机和 G-M 管或伽马谱仪,利用视觉 SLAM(VSLAM)技术开发了一款手持式 3D 辐射测绘设备及软件系统,并初步在核电现场进行了应用。该手持式测绘设备存在 SLAM 场景构建不稳定容易丢失、深度相机体积大的问题。我国也逐渐开始关注该领域的发展,2020 年西南科技大学信息学院采用剂量率仪加载在具有里程计的移动机器人上,采用 2D 激光雷达、Fast-SLAM 算法^[19]构建 2D 地图,通过收集移动路径上的辐射参数,利用马尔可夫链蒙特卡罗算法评估辐射源坐标位置和强度,最后得到了具有源位置信息的辐射场 2D 地图^[20]。该研究验证了辐射环境可视化的可行性,尚未实现 3D 辐射场实时可视化。

当前我国核设施正步入“数字化”高质量发展阶段,仅以核电的辐射防护领域为例,国内 25 台在运行核电机组正在部署应用数字化辐射防护技术支持系统(SMARP 1.0)^[21],对动态辐射大数据高效测量技术的需求愈加迫切。智能辐射三维测绘技术是下一代辐射测量装备的发展方向,目前是各国在辐射防护领域竞相追逐的研究热点。本文针对核设施数字化辐射防护系统前端对近实时数据输入需求和现场辐射防护人员对辐射场可视化的需求,为了解决室内场景快速稳定测量和 γ 剂量率实时定位问题,开展基于深度相机的三维 γ 辐射场快速测量方法研究,研制三维 γ 辐射剂量场实时测量装置,并在核设施现场进行相关性能测试。

1 γ 剂量率测绘方法与系统

为了解决室内场景稳定测量和丰富特征问题以及 γ 剂量率在未知环境中的实时定位问题,本文采用基于三色彩深度图像(红、绿、蓝和深度,RGBD)相机 VSLAM 系统装置及算法^[22-25]。VSLAM 相对于激光 SLAM 的优势在于更适用于室内场景,具有场景特征较丰富、传感器价格更

低、质量轻、体积小等优势,且能满足快速响应(QR)扫码拍摄视频流等需求。在实验室构建测绘样机的基础上,对测绘装置进行外观设计优化,测绘系统装置如图 1 所示,主要由低功耗的先进精简指令集架构处理器(ARM)架构计算机中心、带有惯性测量单元的 RGBD 相机、紧凑低功耗的 γ 剂量率仪以及相关显示、触控、声光报警等模块组成。为适应核设施工作现场通道狭小、辐射热点复杂及辐射场测量效率低等问题,整个装置设计成便携性、模块化、嵌入式的自动化系统,不依赖外部标记物和网络,操作人员只需启动设备手持测量三维场景即可。



图 1 γ 剂量率辐射场测绘装置结构
Fig. 1 Structure of γ dose rate radiation field mapping device

辐射制图(测绘)工作流程如图 2 所示。操作人员通过手持或运载平台搭载 3D 辐射制图终端,进行三维场景信息与剂量信息采集。利用 VSLAM 算法构建 3D 地形,并定位数据采集终端在 3D 场景中的移动轨迹及位置和姿态(位姿)。利用采集的剂量信息与测量路径的关联,采用空间插值法,如克里金插值或反距离平方反比插值法^[26-27]等,可获得测量空间的 3D 辐射剂量率场。空间插值获得的 3D 辐射场是空间立体的,需进一步与 3D 地形关联,不仅是简单的数据叠加,其最重要的意义在于融合数据的增量分析。利用 3D 场景数据(即 3D 地形数据)对辐射场进行约束,通过深度学习模式识别方法对 3D 场景点云进行目标识别,识别目标后将获取目标材质尺寸等信息,进一步加入到辐射热点反演计算中。此外,还可结合 γ 谱仪等核探测器采集能谱信息或成像信息,对 3D 场景中辐射源项分布进行信息增量分析,获得 3D 场景地形及辐射源项位置、源项强度等分布地图,指导现场应急响应、作业方案等辐

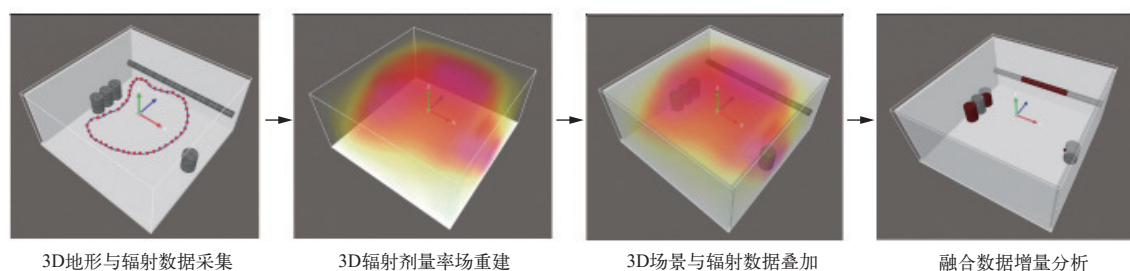


图2 辐射制图工作流程图

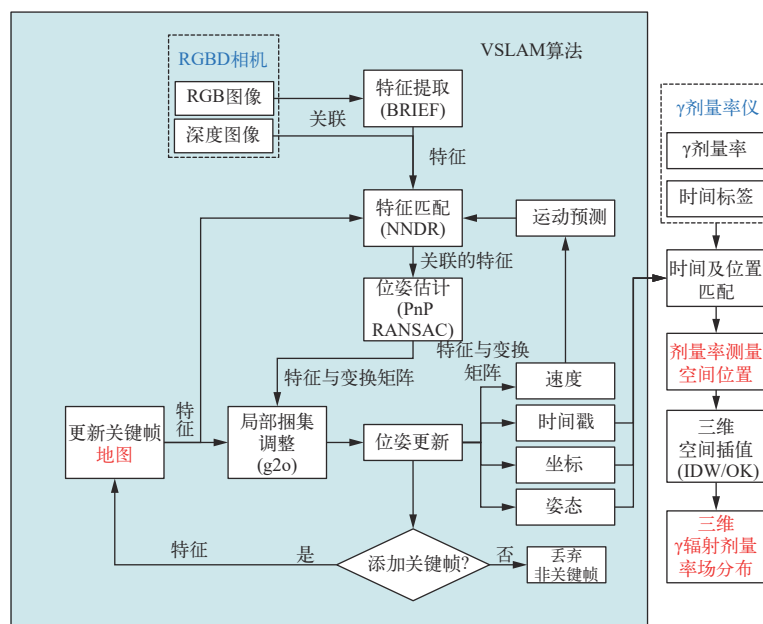
Fig. 2 Radiation mapping workflow diagram

射防护最优化。

1.1 三维 γ 剂量率场快速测量原理

三维 γ 剂量率场快速测量的关键是剂量率测量位置实时定位(即实时测量轨迹),这涉及三维辐射场的重建;其次是三维场景地图的构建,这是由于测量位置的定位依赖于场景地图坐标系,若要将测量轨迹用于辐射防护数字化系统,则需要

将场景与辐射防护数字化系统中的场景进行对齐从而求得变换矩阵。三维 γ 辐射场快速测量原理如图3所示,通过VSLAM算法获取场景地图并定位测量位置坐标、设备姿态和速度等,结合 γ 剂量率仪采集的剂量率和时间信息获取剂量率测量点在空间的位置,再利用三维空间插值算法,获取三维 γ 辐射剂量率场。

图3 三维 γ 辐射场快速测量原理示意图Fig. 3 Principle of rapid mapping of 3D γ radiation field

1.2 VSLAM 算法

SLAM 问题可以采用运动方程和观测方程来描述,如式(1)所示。SLAM 问题就是需要利用运动测量数据 u ,以及观测数据 z 来估算定位 x 问题和构建观测地图 y 问题。

$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}, u_k, w_k) & k = 1, 2, \dots, n \\ z_{k,j} = h(y_j, x_k, v_{k,j}) & j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (1)$$

其中: x 为测量设备自身的位置,按时刻离散为 x_1, x_2, \dots, x_n ; u 为测量设备运动传感器的数据; w 为运动传感器数据的噪声,同样按时刻离散; y 为场景地图的路标,假设某场景路标为 y_1, y_2, \dots, y_m ; $z_{k,j}$ 为观测传感器在位置 x_k 处观测路标 y_j 所产生的观测数据; $v_{k,j}$ 为该观测数据的噪声。

VSLAM 运动数据 u 采用视觉里程计进行计算,观测数据 z 采用RGBD相机获取。其中,RGBD

相机的观测数据含二维 RGB 图和深度图, 通过向像素坐标转换到世界坐标系下, 即可获取计算 RGB 像素点及深度图中点所对应的世界坐标系中的三维坐标数据点。

1) 视觉里程计

视觉里程计目的是检测相机两个姿态的相对运动, 然后将三彩色 (RGB) 图像数据和深度图像数据反投影到重建的 3D 场景中, 该问题可以通过式 (2) 来描述。RGBD 相机任何一个像素点 (u, v) 和该位置处深度 z 都可以利用式 (2) 转换成场景中的 3D 点 (x, y, z) , 转换过程基于相机的内参矩阵和外参矩阵。内参矩阵中 (f_x, f_y) 为 x, y 方向的聚焦长度, (c_x, c_y) 为光心坐标; 外参矩阵 (R, T) 表示旋转平移运动。RGB 图用获取场景颜色, 通过特征提取、匹配和位姿估计算法获取场景的运动; 利用深度图, 通过反投影计算 3D 场景点云, 进而用于推算两个连续帧之间的旋转和平移。

$$z \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & R_{1,3} & T_1 \\ R_{2,1} & R_{2,2} & R_{2,3} & T_2 \\ R_{3,1} & R_{3,2} & R_{3,3} & T_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

2) 回环检测

单纯通过视觉里程计可以推算设备的运动, 但观测数据存在误差, 导致计算的位姿矩阵也会存在误差, 进而测量轨迹的定位会存在漂移, 长时间测量会存在累计误差。减少累计误差和定位漂移的方法是后端优化, 通常可采用粒子滤波算法或图优化算法^[28], 粒子滤波算法是基于后验概率最大原理, 图优化算法则仅对位姿轨迹进行优化, 不再计算场景点云, 减少了计算量, 提高了速度。本文采用图优化算法, 通过回环检测 g2o 图优化算法^[29], 实现位姿图优化, 即当测量设备观测到之前经过的场景区域时, 对位姿图进行调整, 向以前

的约束图中添加新的约束以达到纠正漂移的目的, 具体如图 4 所示, 图 4b 为 RGBD 相机观测的三维场景数据利用视觉里程计构建位姿节点并进行运动变换建立的具有累计误差和定位漂移的测量轨迹和地图, 图 4c 为视觉里程计结合后端图优化, 进行回环检测优化后的测量轨迹和地图。

1.3 辐射测量数据的定位

由于不同传感器 (如 γ 探测器、RGBD 图像传感器等) 并不总是以相同的速率和在相同的时间发布数据, 因此良好的同步对于避免错误的匹配非常重要。剂量率测量在 3D 重建期间以较低的视频频率 (约 20~25 Hz) 更低的频率 (约 2 Hz) 发布采集数据。为了管理剂量率测量位置数据, 须在位置不确定度和计数不确定度之间找到平衡。位置不确定度依赖于测量时间, 计数不确定度反比于测量时间。 γ 剂量率测量数据与轨迹数据的同步方案如图 5 所示, 假设将 γ 剂量率测量分配给特定的时间导致的错误可忽略不计, 剂量测量值被匹配到测量时间内路径积分的中点。并行计算中的时间测量误差约为几 ms, 剂量率测量的最小积分时间约为 1 s。测量定位不确定性主要由仪器在测量积分期间的运动和线性位姿插值方法引起。

2 VSLAM γ 剂量率测量装置硬件

2.1 视觉相机

视觉相机采用 RGBD 相机, RGB 图像分辨率为 1 280×800 像素, 深度图像分辨率为 1 280×720 像素, 视场>90°, RGB 和深度图的采集均采用全局快门帧率 90 帧/s, 测量范围 0.4~6 m。采用该相机结合上述 VSLAM 算法在 6 m×8 m 动作捕捉实验室进行自由行走测量, 测量结果如图 6 所示, 图中青色为测量时的行走轨迹, 行走测量时间小于

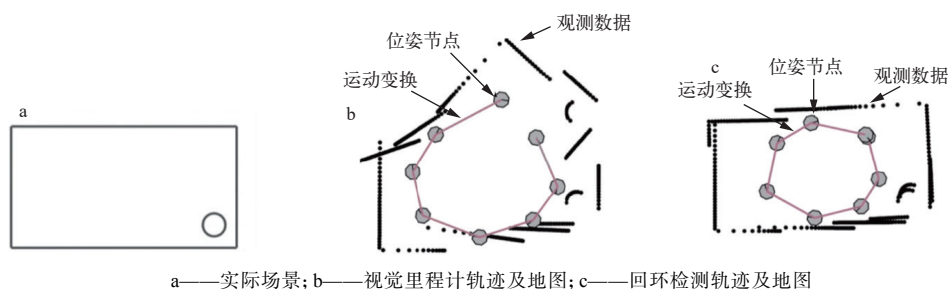


图 4 回环检测位姿图优化原理

Fig. 4 Principle of loop closure detection based on pose graph optimization

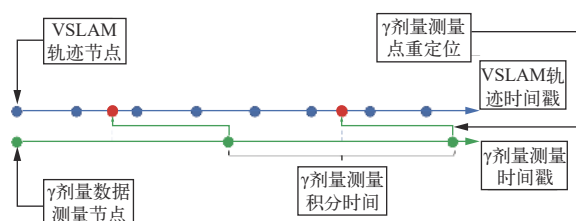
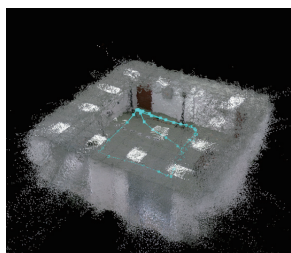
图5 γ 剂量数据的时空对齐Fig. 5 Temporal and spatial alignment of γ dose data

图6 VSLAM 自由行走测量结果

Fig. 6 VSLAM free-moving measurement result

2 min。其他彩色部分为构建的场景点云。该相机配置测量的场景模型特征丰富,能识别动作捕捉实验室的红外相机支架。

通过计算场景点云与真实场景点云的最邻近距离可评估构建的场景点云的质量。激光三维扫描仪的测量精度高,以 Z+F5010 为例,10 m 距离内测量误差小于 0.3 mm,测点速率最大约 110 万点/s,光束直径/发散度为 3.5 mm@1 m/0.3 mrad (1/e2, half angle),其扫描的三维场景可作为参考点云近似真实点云。图 7a 为利用该型号激光扫描仪获取的实验室场景点云(已剪除天花板点云),可见点云稠密、特征丰富、清晰准确。计算 VSLAM 测量的场景与激光扫描仪点云的最邻近距离分布如图 7b 所示,最邻近距离变化范围为 0.00~2.83 m,80% 以上匹配点最邻近距离小于 0.2 m。

采用绝对轨迹误差对 VSLAM 测量轨迹定位精度进行评价。绝对轨迹误差是估计相机位姿和真实位姿的差值,可以直观地反映算法精度和轨迹全局一致性。绝对轨迹误差(A TE_{all})的计算公式如式(3)所示,该公式实际上是每个位姿李代数的均方根误差,这种误差描述了两条轨迹的旋转误差和平移误差,由于假设 γ 剂量率仪无方向性,故只需计算绝对平移误差。

$$ATE_{all} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\| \log \left(T_{gt,i}^{-1} T_{esti,i} \right)^v \right\|_2^2} \quad (3)$$

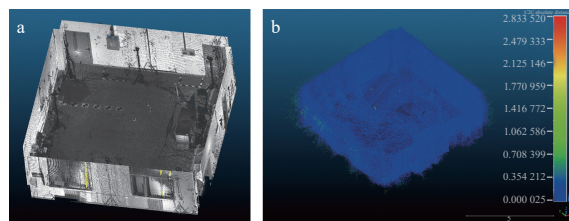


图7 激光扫描仪点云(a)及最邻近距离分布(b)

Fig. 7 Laser scanner point cloud (a) and nearest neighbor distance distribution (b)

其中: $T_{esti,i}$ 为估计轨迹值; $T_{gt,i}$ 为真实轨迹值; i 为位姿节点索引, $i=1, \dots, N$ 。

轨迹真实值的获取采用动作捕捉系统录制。动作捕捉系统通过多个红外相机跟踪贴于运动单元的各部位的反光小球,实时解算运动单元的位置和姿态信息,动作捕捉系统的运动轨迹捕捉精度达亚毫米级(标定结果为 0.6 mm)。采用动作捕捉系统采集的测量轨迹作为真值(即参考轨迹)评价 VSLAM 测量轨迹。实验使用的动作捕捉系统由 8 个 Mars 2H 高速采集相机组成,3D 测量精度 ± 0.15 mm,每个相机 220 万像素,快门帧率 380 帧/s,延迟 2.4 ms,视场 $70^\circ \times 40^\circ$ 。VSLAM 测量的轨迹与动作捕捉系统录制的轨迹采用 SE(3) Umeyama 算法对齐,对齐后计算两组轨迹的绝对平移误差分布,如图 8 所示,绝对平移误差小于 10 cm。测量 5 组数据,计算轨迹绝对平移误差的平均值为 4.2 cm,标准差为 0.4 cm。上述结果表明,RGBD 相机性能满足场景构建及轨迹定位要求。

2.2 γ 剂量率仪

为解决 γ 剂量率仪与 VSLAM 场景测量数据同步问题以及测量装置整体的便携性、模块化需求,设计了一款支持即插即用的紧凑低功耗 γ 剂量率仪模组。 γ 剂量率模组包括 G-M 管、信号调理、主控、通信和电源管理 5 个模块,总体设计框图如图 9 所示。测量模组支持 USB 接口热插拔,通过 USB 充电接口输出 +5 V 电源为测量模组供电。G-M 管与高压电路模块组成的小型气体探测器将 γ 射线转换成核脉冲信号;信号调理模块滤除该核信号的高频噪声,提高信噪比。主控模块进行脉冲计数等数据处理,通过建立脉冲计数率与 γ 射线的辐射剂量率线性拟合函数关系式,实现脉冲计数率与剂量率的转换。最后通过 USB 通讯模块将得到的剂量率等核辐射数据传输到 ARM 计算机中心并显示到触摸屏。 γ 剂量率

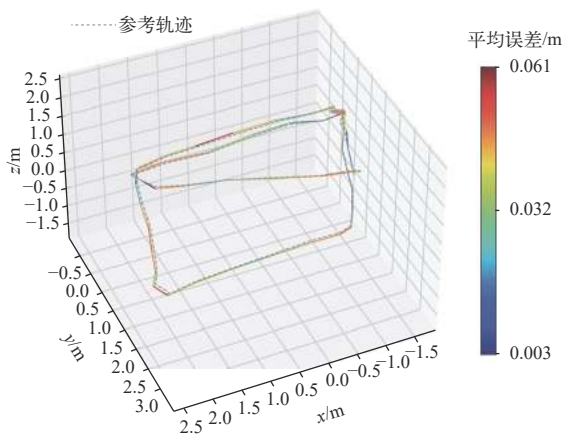


图8 轨迹绝对平移误差分布

Fig. 8 Distribution of absolute translational error

仪模组总质量小于 200 g, 测量范围 0.1 $\mu\text{Gy/h} \sim 10 \text{ Gy/h}$, 能量范围 60 keV \sim 3 MeV, 功耗 10 mW, 响应时间小于 3 s。

在中国辐射防护研究院国家二级计量站进行能量响应、角度响应及剂量率测量相对偏差测试, 其结果如图 10 所示。采用 γ 射线空气比释动能标准装置测量角响应, 角度测量范围为 $\pm 90^\circ$, 每 30° 设 1 个测量点, 除设备遮挡部分外, 设备角度

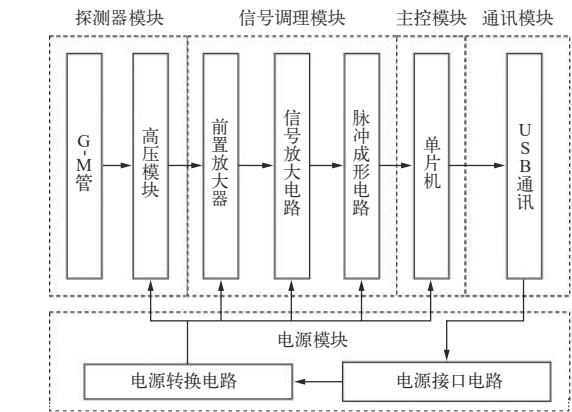
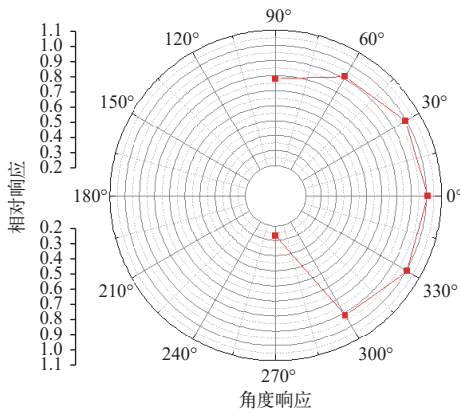


图9 支持热拔插的 G-M 管伽马剂量率仪设计方案

Fig. 9 Design scheme of hot-pluggable G-M tube gamma dose rate meter

响应误差小于 15%; 采用 320 kV X 光机辐射场剂量率装置测量能量响应, X 光机发射 X 射线在 60 \sim 160 keV 能量范围内能量响应的相对误差小于 $\pm 15\%$ ($\pm 11\%$ @662 keV, $\pm 14.5\%$ @1 250 keV)。 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 源剂量率测量结果表明, 在 20 $\mu\text{Sv/h} \sim 20 \text{ mSv/h}$ 剂量率范围内, 剂量率测量的相对误差小于 $\pm 5\%$ 。以上结果表明, 作为手持式设备, 该 γ 剂量率模组性能符合测量要求。

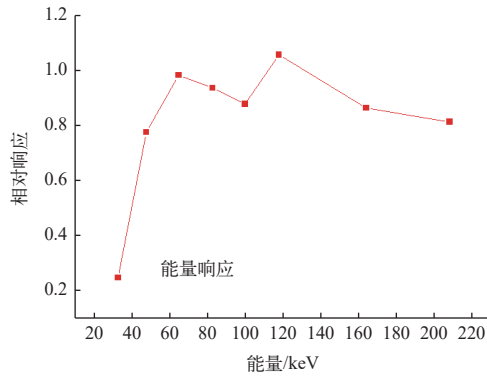


图10 角度响应及能量响应

Fig. 10 Angle response and energy response

3 核设施现场应用

传统辐射剂量率场测量设备如图 11a 所示, 本文研制的 VSLAM γ 剂量率场快速测量装置如图 11b 所示。可见本文研制的测量装置体积小巧便携, 一体化程度高。传统设备包括剂量率仪、全站仪和激光扫描仪, 共 3 台仪器, 剂量率仪测量剂量、全站仪测轨迹、激光扫描仪测量场景; 每台仪器分别架设, 分开测量, 需多人协作和长时间数

据处理。

3.1 测量效率

针对某核设施核岛内房间, 采用传统测量设备与 VSLAM γ 剂量率快速测量装置进行测量, 结果如图 12 所示。传统方法首先采用三维激光扫描仪扫描三维场景, 一站数据采集, 从架设装置到测量结束需要 5 \sim 10 min; 然后采用全站仪和剂量率仪采集位置和剂量数据, 从架设装置到设置仪

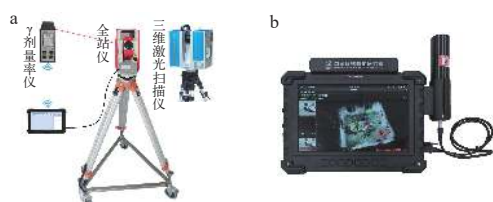


图 11 传统测量设备(a)和 VSLAM γ 剂量率快速测量装置(b)

Fig. 11 Traditional radiation measurement equipment (a) and VSLAM γ dose rate rapid measurement device (b)

器参数一站约需 3~5 min, 此外, 采点效率约 30 s/个。而便携式 VSLAM γ 剂量率测量设备, 可一人操作, 且自由行走测量, 可实时且同步捕获空间三维场景、测量点位置及辐射剂量数据, 自动采集实时显示, 采点效率约 3 s/个。由图 12 可知, VSLAM γ 剂量场智能测绘装备测量效率相对传统方法提升了 10 倍。

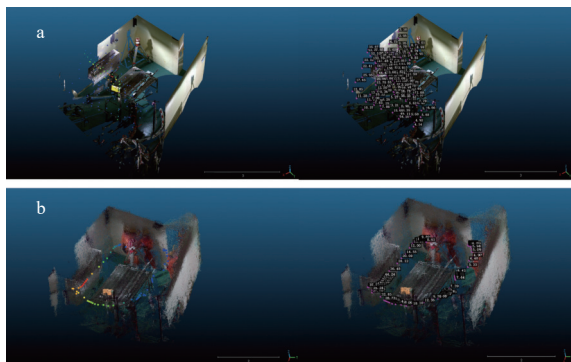


图 12 传统测量设备(a)与 VSLAM γ 剂量率快速测量装置(b)的测量结果

Fig. 12 Measurement results of traditional radiation measurement device (a) and VSLAM γ dose rate rapid measurement device (b)

3.2 定位准确性

VSLAM γ 剂量率快速测量设备具备同时测量场景和定位的功能, γ 探头的轨迹定位数据与传统轨迹测量设备(全站仪)采集的本设备 γ 探头的移动轨迹数据如图 13 所示, 红色为本设备自定位的轨迹, 蓝色为全站仪采集的本设备 γ 剂量率探头轨迹, 两者的平均匹配距离为 18 cm, 最小匹配距离 10 cm。VSLAM γ 剂量率快速测量设备采集的轨迹信息与全站仪测量的轨迹数据对齐利用 VSLAM 采集的场景点云。全站仪采集时, 需要设置测站点和前站点, 通过在 VSLAM 采集的场景点云中获取测量站点和前站点靶标纸的位置, 计算空间转换矩阵实现全站仪轨迹坐标变换到

VSLAM 采集的场景点云中, 以便于对比分析。由于轨迹对齐依赖场景点云, 而 VSLAM 场景中点云模型与真实场景存在匹配距离, 此外点云平面拟合偏离程度的存在, 导致获取的靶标点位置不准确, 空间变换存在误差, 误差累计导致轨迹的匹配距离较大。累计误差和参考轨迹获取的途径不同, 导致轨迹定位偏差较设计值大。

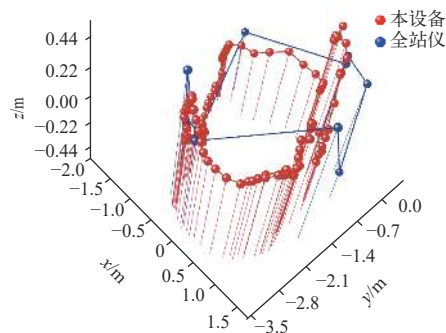


图 13 VSLAM γ 剂量率快速测量设备自定位与全站仪采集的轨迹数据

Fig. 13 VSLAM γ dose rate rapid measurement device self-localization and trajectory data collected by total station

3.3 数字化系统与辐射场插值

VSLAM γ 剂量率测量设备可一次性测量并自动耦合三维场景与轨迹及剂量信息, 通过 WIFI 将轨迹及剂量数据传输给数字化辐射防护系统。通过选取模型的共同特征点计算空间变换矩阵, 实现设备测量的场景模型与数字化系统模型的对齐。针对该空间变换矩阵设置设备启动位置, 并采用标靶纸标记。测量设备在数字化仿真大厅 (SMARP 系统演示大厅) 自由行走测量, γ 放射源 (^{137}Cs 源, 活度 $4.8 \times 10^6 \text{ Bq}$) 位于瓶中, 置于箭头所示地面, 测量结果及其与数字化系统的联动情况如图 14 所示。由图 14 可见, 测量设备系统与 SMARP 系统实现了设备测量轨迹及剂量率在数字化系统模型中的联动。采用克里金空间插值法计算的空间辐射场分布显示于数字化系统中, 通过颜色信息能轻松识别 γ 放射源的位置。根据插值结果, 利用剂量率梯度下降算法^[30], 可计算该单一 γ 源下放射源位置, 其定位误差小于 0.8 m。

4 结论

本文建立了基于 VSLAM 技术与 γ 剂量探测技术结合的辐射场快速测量方法, 根据该方法设计了一套 VSLAM γ 剂量率场测量装置, 形成了核

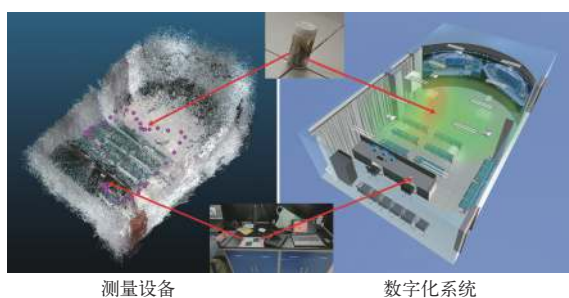


图14 VSLAM γ 剂量率测量设备
与数字化辐射防护系统的联动

Fig. 14 VSLAM γ dose rate rapid measurement device
linked with digital radiation protection system

设施现场测试流程和测量效率、定位准确性和数字化兼容的评价方法。VSLAM γ 剂量率场测量装置采用RGBD相机获取设备的运动轨迹和场景信息,利用时间戳和积分路径中点方法实现 γ 剂量数据与轨迹测试数据的时空匹配。核设施现场测试表明,与传统测量方法相比,基于新方法的辐射剂量率测量效率提升了10倍,与动作捕捉系统测量轨迹平均匹配距离4.2 cm,与传统轨迹测量设备(全站仪)测量轨迹平均匹配距离18 cm;与数字化系统联动,实现了辐射场三维空间插值,单一 γ 源定位误差小于0.8 m。

后续将进一步改进现场测试评估方法,降低轨迹匹配误差,并针对多 γ 源和分布式源进行识别和定位。

参考文献:

- [1] HANABUSA R, NAGASE Y, MITSUI S, et al. 3D map generation for decommissioning work[C]//2020 3rd International Conference on Intelligent Autonomous Systems (ICoIAS). USA: IEEE, 2020
- [2] PEPPEROSA A, MORICHI M, ROGO F. An innovative platform allowing digitization of operative Radioprotection measurements and to characterize NORM, TENORM and nuclear waste[C]//Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in Industry. [S. l.]: [s. n.], 2022.
- [3] MASCARICH F, PAPACHRISTOS C, WILSON T, et al. Distributed radiation field estimation and informative path planning for nuclear environment characterization[C]//2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). USA: IEEE, 2019.
- [4] APIKYAN S, DIAMOND D. Nuclear threats and security challenges[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015.
- [5] AMIARD J C. Military nuclear accidents[M]. USA: Wiley, 2018.
- [6] LOUKA M N, BRASETH A O, SZŐKE I, et al. Using VR and AR technologies to enhance safety, security, and efficiency in smart digital systems for optimising dismantling and waste management[C]//International Nuclear Digital Experience. [S. l.]: [s. n.], 2018
- [7] SATO Y, MINEMOTO K, NEMOTO M, et al. Construction of virtual reality system for radiation working environment reproduced by gamma-ray imagers combined with SLAM technologies[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2020, 976: 164286.
- [8] CHIZHOV K, SNEVE M K, SZŐKE I, et al. 3D simulation as a tool for improving the safety culture during remediation work at Andreeva Bay[J]. *Journal of Radiological Protection*, 2014, 34(4): 755-773.
- [9] SZŐKE I, LOUKA M N, BRYNTESEN T R, et al. Comprehensive support for nuclear decommissioning based on 3D simulation and advanced user interface technologies[J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2015, 52(3): 371-387.
- [10] VABØ R, PIOTROWSKI L, RINDAHL G. 3D representation of radioisotopic dose rates within nuclear plants for improved radioprotection and plant safety[M]//YOSHIKAWA H, ZHANG Z. Progress of Nuclear Safety for Symbiosis and Sustainability. Tokyo: Springer Japan, 2014: 275-281.
- [11] CADENA C, CARLONE L, CARRILLO H, et al. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, 32(6): 1309-1332.
- [12] BARNOWSKI R, HAEFNER A, MIHAILESCU L, et al. Scene data fusion: Real-time standoff volumetric gamma-ray imaging[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2015, 800: 65-69.
- [13] HAEFNER A, BARNOWSKI R, LUKE P, et al. Hand-held real-time volumetric 3-D gamma-ray imaging[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2017, 857: 42-49.
- [14] HELLFELD D, BARTON P, GUNTER D, et al. Real-time free-moving active coded mask 3D gamma-ray imaging[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2019, 66(10): 2252-2260.
- [15] HELLFELD D, BANDSTRA M S, VAVREK J R, et al. Free-moving quantitative gamma-ray imaging[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 20515.
- [16] SHERMAN T H. Robotics plan in support of dome

- testbed operations[R]. USA: Idaho National Laboratory (INL), 2023.
- [17] HAUTOT F, DUBART P, BACRI C O, et al. Visual simultaneous localization and mapping (VSLAM) methods applied to indoor 3D topographical and radiological mapping in real-time[J]. EPJ Nuclear Sciences & Technologies, 2017, 3: 15.
- [18] MCENTIRE J, MCGEE D. Use of the manuela 3D/radiation scanning tool at nuclear facilities-20437[C]//WM2020 Conference. [S. l.]: [s. n.], 2020.
- [19] MONTEMERLO M, THRUN S, KOLLER D, et al. Fast-SLAM: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem[C]//The Eighteenth National Conference on Artificial Intelligence. [S. l.]: [s. n.], 2002.
- [20] XIAO Y, ZHANG C, LUO J, et al. Integrating the radiation source position into a grid map of the environment using a mobile robot[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2020, 976: 164253.
- [21] LIU L, ZHAO Y, LI H, et al. An exposure dose evaluation system based on virtual reality technology[R]. Vienna: IAEA, 2022.
- [22] 周治国, 曹江微, 邸顺帆. 3D 激光雷达 SLAM 算法综述[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 13-27.
- ZHOU Zhiguo, CAO Jiangwei, DI Shunfan. Overview of 3D lidar SLAM algorithms[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(9): 13-27(in Chinese).
- [23] 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 algorithms for indoor mobile robots[J]. Computer Science, 2021, 48(9): 223-234(in Chinese).
- [24] ENDRES F, HESS J, STURM J, et al. 3-D mapping with an RGB-D camera[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(1): 177-187.
- [25] KANG X, LI J, FAN X, et al. Real-time rgb-d simultaneous localization and mapping guided by terrestrial lidar point cloud for indoor 3-D reconstruction and camera pose estimation[J]. Applied Sciences, 2019, 9(16): 3264.
- [26] 李华, 赵原, 刘立业, 等. 基于克里金理论的辐射剂量场插值重构与可视化研究[J]. 辐射防护, 2019, 39(6): 475-482.
- LI Hua, ZHAO Yuan, LIU Liye, et al. Research on interpolation reconstruction and visualization of radiation dose field based on Kriging theory[J]. Radiation Protection, 2019, 39(6): 475-482(in Chinese).
- [27] 张海平, 周星星, 代文. 空间插值方法的适用性分析初探[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(6): 14-18, 105.
- ZHANG Haiping, ZHOU Xing, DAI Wen. A preliminary on applicability analysis of spatial interpolation method[J]. Geography and Geo-information Science, 2017, 33(6): 14-18, 105(in Chinese).
- [28] KAZEROUNI I A, FITZGERALD L, DOOLY G, et al. A survey of state-of-the-art on visual SLAM[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 205: 117734.
- [29] JURIC A, KENDES F, MARKOVIC I, et al. A comparison of graph optimization approaches for pose estimation in SLAM[C]//2021 44th International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO). USA: IEEE, 2021.
- [30] BAIDOO-WILLIAMS H E, DASGUPTA S, MUDUMBAI R, et al. On the gradient descent localization of radioactive sources[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2013, 20(11): 1046-1049.