

智能化巡检机器人辐射分布地图构建算法研究

洪雅楠, 刘阳, 潘妙, 吴建华, 陈旭标, 肖思敏
(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 针对核电站辐射水平监测需求, 搭建了一套基于智能巡检机器人的辐射分布地图构建系统。本系统通过智能巡检机器人的定位和建图技术采集离散的辐射数据, 基于单点放射源假设, 使用粒子滤波算法对放射源参数进行估计并重构整个区域内的辐射场分布, 再实现辐射分布与区域栅格地图的融合和可视化展示。通过实测和模拟辐射场剂量数据对比对辐射分布地图构建效果进行验证, 结果表明, 本系统对所用单点源的辐射分布重建结果的平均相对误差约为 16%, 在辐射数据稀疏测量的情况下也能快速实现辐射分布地图构建。

关键词: 辐射分布地图; 粒子滤波算法; 智能巡检机器人

中图分类号: TL751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7512(2025)04-0345-07

doi: [10.7538/tws.2025.youxian.006](https://doi.org/10.7538/tws.2025.youxian.006)

Research on Radiation Map Reconstruction Algorithm Based on Intelligent Inspection Robot

HONG Yanan, LIU Yang, PAN Miao, WU Jianhua, CHEN Xubiao, XIAO Simin
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: In order to survey the radiation of nuclear power plants, an algorithm for reconstructing radiation map was built based on an intelligent inspection robot system. A set of discrete radiation data with location information was collected through simultaneous localization and mapping method. Based on the assumption of single point radioactive source, an improved particle filter algorithm was developed to estimate the parameters of the radioactive source and reconstruct the radiation distribution. Finally, the distribution was combined with the scene map for a visual presentation. The effect was verified through the comparison between measured and simulated values. The results show that in the scene with a single point radiative source the average relative error is about 16% and it works well even if the input radiation data is relatively sparse.

Key words: radiation distribution map; particle filter algorithm; intelligent inspection robot

中国核电近年来发展迅速, 在未来具有良好的发展前景^[1]。这对于同位素生产、后处理等核领域方面也带来了更多需求。核设施内,

通过对各种仪器仪表所需工作环境和辐射水平的异常状态监测, 可以提高安全性和效率^[2]。在事故或应急情况下, 如福岛事故后, 使用机器

收稿日期: 2025-01-23; 修回日期: 2025-04-14

基金项目: 中核集团集中研发项目(22122)

通信作者: 刘阳

人代替人员进行检查、维护和去污的需求大幅增加,机器人可减少操作人员受辐照水平,并完成更为复杂的检测工作,如环境辐射水平监测、污染源识别、乏燃料状态监测以及其他检查任务^[3]。随着机器人技术发展,商用组件与机器人操作系统兼容性提高,机器人在核电站工作中的智能化程度大幅提升^[4-5],使用智能化巡检机器人实现核电站内部辐射分布地图绘制可以减少人工测量误差,形成可分析性强的辐射监测记录数据库,为剂量优化和防护提供指导方案。

辐射分布地图构建技术是一种利用辐射测量数据构建环境辐射场的技术,可以用于辐射安全评价、环境辐射监测、重大事故应急等领域,用于评估核设施的辐射环境影响、监测核辐射事故扩散范围、制定核事故应急预案等。辐射分布构建方法主要可分为计算和监测两大类:计算类有点核积分、蒙特卡罗、离散纵标等方法;监测类一般指部署固定或移动辐射测量设备来获取辐射场数据。当放射源参数未知时,辐射剂量场分布的调查主要依靠辐射探测器监测,利用辐射探测器构建传感器网络采集环境中的辐射数据,通过构建数学模型对未知辐射场分布进行重构。使用插值算法处理监测数据是较为常见的辐射地图重建方法,但是简单的线性插值、网函数插值和反距离权重插值对辐射监测数据量要求很大^[6-9],即便使用复杂的泊松克里金插值算法处理稀疏的辐射监测数据仍不能获得很好地重建结果,王振宇等^[10]认为样本数据量为网格点数的1/10时,泊松克里金算法结果较好,同时插值算法对辐射测量数据间隔规律的要求在非结构化核环境中难以实现^[11]。基于神经网络的辐射分布重构方法^[12-13],目前对于不同环境的迁移学习仍需研究,在不同环境下的辐射重建需要重新学习和训练。

本研究针对已有的辐射地图重构技术中所存在的对稀疏辐射测量数据重建效果较差等问题,搭建了智能化巡检机器人辐射分布地图构建系统,通过机器人在未知环境中探索并构建栅格地图,采用粒子滤波算法对放射源参数进行估计并重构整个辐射分布与区域栅格地图相融合,将未知环境中的辐射分布情况进行可视化展示。

1 辐射分布地图构建

1.1 智能化巡检机器人系统组成

智能化巡检机器人系统采用杭州宇树科技Aliengo智能机器人作为运动底盘,Aliengo具有复杂地形自适应能力和高爆发性运动性能,可实现2 h以上的运动续航,满足不同环境中长时间构建辐射地图的需要。在机器人上方搭载有1个16线激光雷达(Rs-Lidar-16)以及Aliengo自身携带的高频惯性导航单元。两者共同帮助机器人实现定位并获取周围环境信息,同时生成二维栅格地图。CsI(Tl)辐射探测器和无线Mesh组件分别安装在机器人前、后方不干涉激光雷达工作的位置。前者用于进行辐射数据的测量,后者用于与上位机的通讯交互。系统硬件构成示于图1。

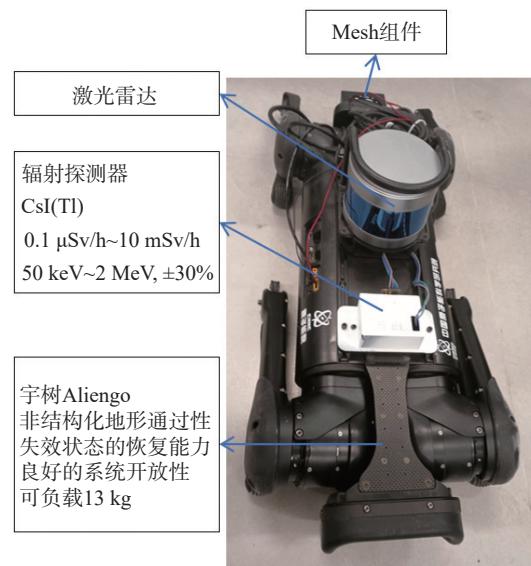


图1 系统硬件组成

Fig.1 System hardware composition

1.2 辐射测量定位

巡检机器人在目标环境中首次进行辐射地图构建时,需通过实时定位与地图构建技术生成当前环境地图,后续便可依托已有地图实现自主导航和巡检工作。本研究通过LIO-SAM算法^[14]生成三维体素地图,并使用ROS Gmapping功能包转为二维栅格地图,LIO-SAM算法基于因子图的紧耦合雷达惯性里程计框架,适合多传感器融合和全局优化,并通过局部的划窗匹配方法进行关键帧匹配以保证系统的实时性,可以满足智能巡检机器人实时构建环境地图需

求。在已有地图的情况下使用正态分布变换方法对实时点云进行匹配并获得巡检机器人的实时位置信息。本研究设定采样频率分别为 1 Hz 和 30 Hz, 通过探测数据的时间戳寻找相邻两帧的实时定位信息, 对位置信息进行线性插值以确定当前探测数据对应位置。该辐射测量定位误差主要受辐射测量频率、定位频率、机器人移动速度和点云匹配误差影响, 其中误差来源最大为点云匹配误差。重复定位实验表明, 目前本套系统参数可获得的定位误差约为 25 cm。通过辐射测量定位可获得离散的辐射测量数据 (z_k, x_k, y_k) , 即第 k 次测量时的辐射测量值 z_k 和辐射测量点位二维坐标 (x_k, y_k) 。

1.3 通用插值算法

反距离权重插值法(inverse distance weighted, IDW)是一种全局插值方法, 利用待插值点周围样本的信息对待插值点数据进行计算, 并根据插值点到样本点距离的幂为权重进行加权平均, 样本点离插值点越近, 权重越大, 其公式如下:

$$z_i = \frac{\sum_j^N z_j / d_{ij}^p}{\sum_j^N 1 / d_{ij}^p} \quad (1)$$

式中, N 为样本点个数, z_i 为待插值点数值, z_j 为测量点 j 处的测量数据, d_{ij} 为两点之间的距离, p 为距离权重参数。

克里金插值法在二阶平稳的假设下, 以变差函数理论为基础, 对整个研究区域内的区域化变量进行线性无偏、最优估计的一种插值方法。克里金法假定采样点之间的距离或方向反映了可用于解释曲面变化的空间相关性, 将数学函数拟合到指定数量的点或指定半径内的所有点上, 以确定每个位置的输出值, 可写为通用的插值表达式:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (2)$$

式中, $Z(s_i)$ 为第 i 点的测量数据, λ_i 为第 i 点数据的权重, s_0 为待插数据点位置, N 为总测量数据个数。权重 λ 取决于测量点的拟合模型、到待插点位的距离、以及周围测量值之间的空间关系。普通克里金法(ordinary kriging, OK)假设属性值在各个空间位置的数学期望都是同一个常数, 并在此假设下求解使所有待插点的估计值与真实值差的方差最小时的权重:

$$\begin{cases} Z(s) = \mu + \varepsilon(s) \\ \min_{\lambda_i} \text{Var}(\hat{z}_0 - z_0) \end{cases} \quad (3)$$

式中, Z 为测量数据, μ 为估计常数, ε 为测量误差, z_0 为待插数据。

通用插值算法在样本数据分布均匀且样本数量大的条件下能够较好地描述场分布情况, 但对稀疏小样本很难形成较好水平的插值结果。

1.4 辐射分布重建的粒子滤波法

通过粒子滤波算法实现辐射分布重建: 先通过粒子滤波算法实现放射源的强度和位置状态的估计, 再基于放射源状态估计结果进行辐射分布理论计算。

粒子滤波算法作为一种基于蒙特卡罗方法的近似贝叶斯滤波算法, 广泛应用于非线性、非高斯系统。粒子滤波算法是利用一组离散的粒子来近似表示系统状态的后验概率密度函数, 从而估计系统参数。在放射源状态预测场景下, 粒子滤波以辐射探测器观测值为输入, 以加权粒子作为状态向量, 通过递归估计逐步引导粒子聚集和状态收敛, 最终以加权均值作为预测输出。

基于标准粒子滤波算法框架进行放射源参数估计后进行辐射场计算如图 2 所示, 具体算法步骤如下。

(1) 粒子初始化。辐射分布地图构建中, 机器人移动测量的尺度远大于放射源的线性尺度, 故将场景中的源视为点源, 即只考虑放射源的活度和空间位置而不考虑其体积大小。在移动机器人搜索区域中, 均匀随机地建立初始状态的带权粒子集 $\{X_0^m, w_0^m\}_{m=1}^M$, 其中粒子状态向量 $X_0^m = [x_0^m, y_0^m, A_0^m]$ 的活度参数的对数和位置参数均满足均匀分布, 每个粒子的权重相同且满足 $w_0^m = 1/M$, 表示初始状态下放射源均匀分布于搜索区域中的任意位置。

(2) 观测更新粒子权重。每当有新的观测值 z_k 时, 需要更新粒子权重 $\{w_k^m\}_{m=1}^M$ 。根据马尔科夫定理的假设, 不同时刻的观测值相互独立, 则可用已知的概率密度分布并确定似然概率分布来替代非线性非高斯的后验概率, 即由公式 $w_k^m \propto w_{k-1}^m p(z_k | X_k^m)$ 更新 k 时刻各个粒子的权重, 其中 $p(z_k | X_k^m)$ 表示在 X_k^m 该粒子状态下测得观测值 z_k 的概率。在单点源和不考虑衰减的假设下, 在观测点处单位时间内辐射测量值的期望可表示为:

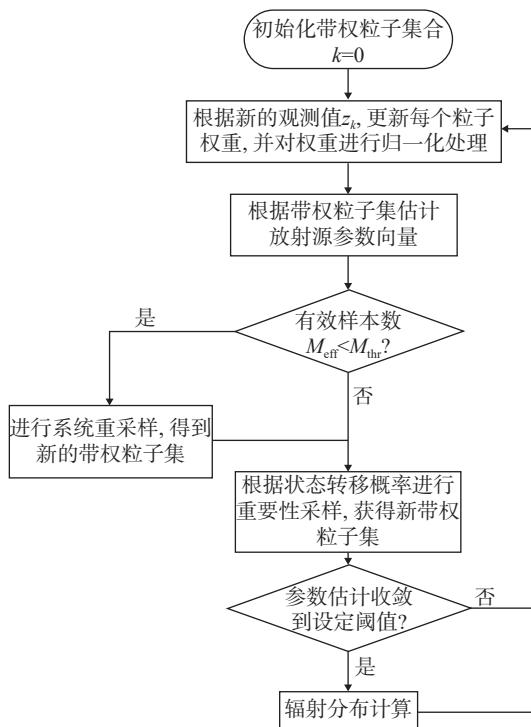


图 2 辐射分布地图构建的粒子滤波算法流程图

Fig.2 Construction of radiation map using particle filter algorithm flowchart

$$\lambda = E(z_k) = \frac{\varepsilon A}{4\pi R^2} \quad (4)$$

式中, R 为观测点到放射源的距离, ε 为探测效率。在该处辐射测量的实测值与期望值服从泊松分布, 当实测值较大时, 可近似为满足期望与方差均为 λ 的正态分布, 则此时:

$$p(z_k|X_k^m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda}} \exp(-{(z_k - \lambda)^2}/2\lambda) \quad (5)$$

(3) 粒子权重归一化。对更新后的粒子权重集合 $\{w_k^m\}_{m=1}^M$ 进行粒子权重的归一化:

$$\tilde{w}_k^m = w_k^m / \sum_{j=1}^M w_k^j \quad (6)$$

(4) 放射源参数估计。已知更新后的带权

粒子集合为 $\{X_k^m, \tilde{w}_k^m\}_{m=1}^M$, 则放射源的参数向量可由带权粒子集合的加权和估计为:

$$\hat{X}_k = \sum_{m=1}^M X_k^m \tilde{w}_k^m \quad (7)$$

(5) 系统重采样。根据有效样本理论, 使用有效样本数 M_{eff} 来描述粒子样本退化程度, 用 $M_{\text{eff}} = 1/\sum_{i=1}^M (w_k^i)^2$ 近似估计有效样本数, 若小于设定的阈值 M_{thr} , 则通过系统重采样得到新的带权粒子集合, 否则保持带权粒子集合不变。

(6) 从状态转移概率 $p(X_k|X_{k-1})$ 中采样, 得到新的样本, 基于准静态辐射场假设, 放射源参数不随时间发生变化, 故将状态转移概率置为 1。

(7) 当放射源参数向量估计收敛到设定阈值时, 开始通过辐射测量值期望公式进行辐射场的计算, 并根据机器人径迹进行有效半径路径的蒙版操作。

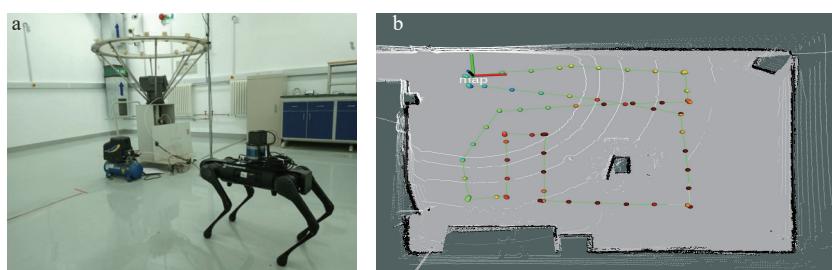
(8) 重复执行(2)~(7)步骤至机器人辐射地图构建行为停止。

2 实验与分析

为验证粒子滤波算法对稀疏测量数据集进行辐射分布地图构建的准确性和有效性, 先在待测场景的现场试验中采集相关辐射数据, 再通过对待测场景的仿真模拟获得辐射场的理论分布数据, 然后根据辐射场理论模拟数据和机器人系统的现场试验结果, 比对 IDW 法、OK 法和粒子滤波算法构建辐射分布性能的差异, 并与理论辐射场分布进行对比, 验证粒子滤波算法构建辐射分布地图的有效性。

2.1 辐射数据采集

在个人剂量实验室进行辐射分布地图构建实验, 现场环境如图 3a 所示, 先手动控制机器人遍历整个房间生成二维栅格地图, 再在系统



a——机器人在个人剂量室采集辐射数据; b——形成的二维栅格地图和离散的辐射数据

图 3 智能巡检机器人辐射数据采集

Fig.3 Radiation data acquisition by intelligent inspection robot

中指定测量点位,将机器人放置在初始位置后启动自主巡检任务,由机器人自主完成房间内的辐射分布地图构建工作。由于目前本系统自主巡检工作中定位误差约为25 cm,且放射源附近存在气泵、支架等障碍,故围绕放射源安全距离外共设置78个探测点位,获得在二维栅格地图上分布的辐射数据如图3b所示。

2.2 重建结果分析

本实验所探索环境参数如下:待探索环境为小尺度房间,房间尺寸为7.1 m×5.7 m×3.7 m,若以房间三维中心为直角坐标系原点,则Cs-137源位置为(0.33 m, -0.41 m, 1.6 m),源活度为 7.4×10^9 Bq,探测器活动高度为0.6 m。利用Geant4软件G4PSFlatSurfaceFlux计算卡,根据放射源的位置和放射性活度,模拟获得间隔为0.1 m网格各节点处的光子注量率,再通过周围剂量当量率转换系数获得模拟辐射场结果示于图4。

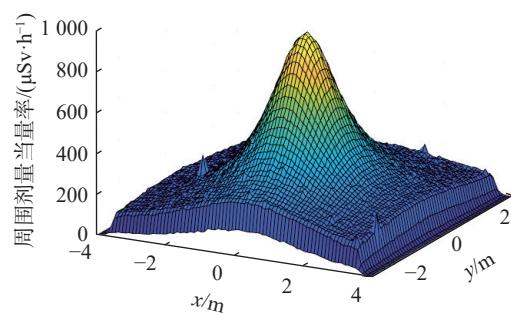


图4 Geant4模拟实验场地辐射场分布

Fig.4 Radiation field distribution of the Geant4 simulation experiment site

分别使用反距离插值法(以下简称IDW)、普通克里金法(以下简称OK)和粒子滤波法(以下简称PF)等三种方法对实验数据进行辐射分布重建,并将重建结果与Geant4模拟数值结果进行对比,如图5所示。并使用最大绝对偏差、平均绝对偏差、最大相对偏差和平均相对偏差

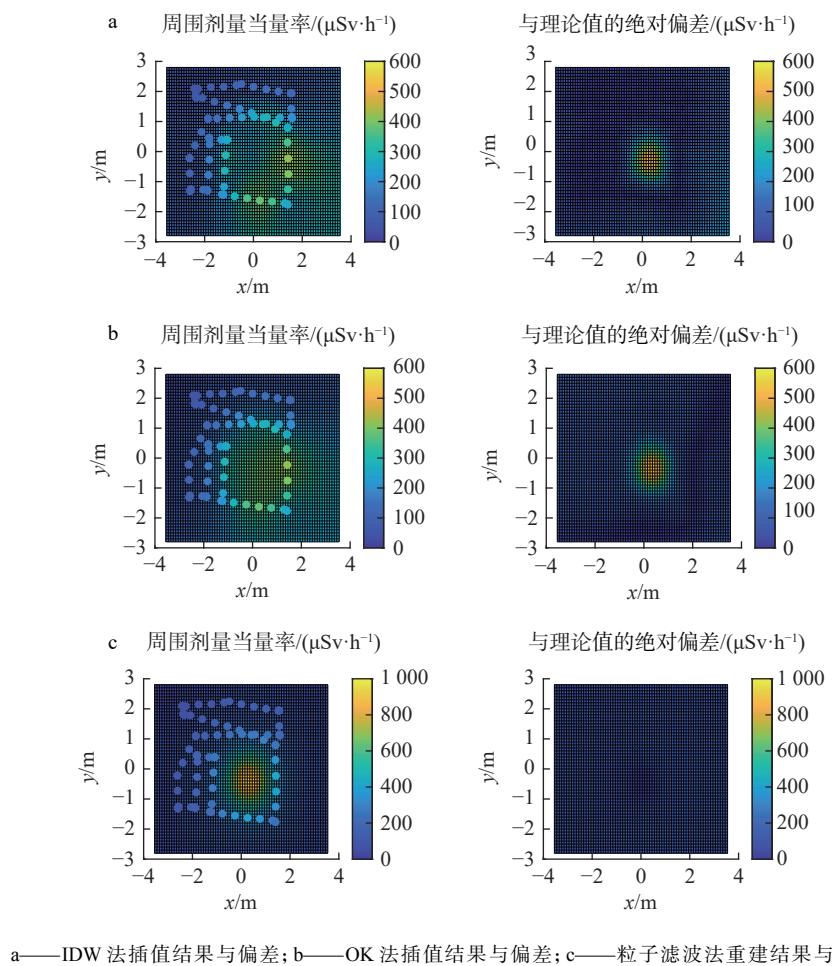


图5 辐射分布重建结果分析

Fig.5 Analysis of the radiation distribution reconstruction results

等四个参数来评价辐射分布重建结果的准确性列于表1。

插值网格以0.1 m为间隔,整个区域内辐射场总插值点数为4104个,78个测量数据对总插值点而言稀疏,不同强度辐射数据测量点位分布不均匀,导致IDW法和OK法插值后的辐射场与理论辐射场相比,水平方向上的偏差明显,对理论上低剂量位置处有高剂量的错误估计,故插值结果的相对偏差很大。同时由于机器人

受场地限制难以靠近放射源近处进行辐射测量,测得的最大剂量率为410 $\mu\text{Sv}/\text{h}$,使用这两种插值算法使整个辐射场最大值不会超过410 $\mu\text{Sv}/\text{h}$,那么在面临实际使用时,上述两种插值法可能需要更进一步地探测,设备运行时间变长,周围环境剂量率也会更高。那么在实际应用时,对探测器的测量范围和运动机构的耐辐射性能要求也会更高,由此来看,插值算法在应用时便存在一定局限性。

表1 辐射分布重建结果评价表

Table 1 Evaluation of the radiation distribution reconstruction results

算法	最大绝对偏差/($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)	平均绝对偏差/($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)	最大相对偏差/%	平均相对偏差/%
IDW	629	100	143	90
OK	448	62	22	62
PF	100	14	46	16

注: IDW, 反距离权重插值法; OK, 普通克里金法; PF, 粒子滤波法。

粒子滤波算法设置粒子总数为200,当放射源位置(\tilde{x}, \tilde{y})估计的方差小于(0.25 m)²且活度估计满足 $\sigma(\tilde{A}) < 0.2\tilde{A}$ 时,认为算法已经收敛,开始生成辐射场重建结果。实验从第31个测量点位开始收敛,最终放射源估计结果收敛于($x=0.21 \text{ m}$, $y=-0.5 \text{ m}$, $A=9\times 10^9 \text{ Bq}$),标准差为(0.21 m , 0.13 m , $2.6\times 10^7 \text{ Bq}$)。粒子滤波法所得放射源活度估计值高于实际值,这是因为从注量公式计算的剂量率没有考虑光子散射等影响,会低于理论剂量率数值,导致算法收敛过程中自动调大活度估计值使测量数据期望与实测匹配,但由于辐射分布由注量公式计算所得,放射性活度在使用粒子滤波法进行辐射分布计算过程中可以消去,故放射性活度偏差对粒子滤波法准确性影响较小。由于注量公式计算值偏低导致粒子滤波算法与理论值存在一定偏差。总体而言,从相对偏差较低来说,粒子滤波算法具有一定优势,同时该算法对于在一定区域环境中,快速并较为准确地形成辐射分布来说,粒子滤波的算法优势便更为明显了,因此在面向如应急场景时,对单点源的辐射场重建一定程度上适用性更强。

在辐射分布与栅格地图融合中,为更好地进行数据可视化,当粒子滤波算法未收敛时,采用有效半径为0.5 m的IDW法进行二维辐射场插值,当粒子滤波算法收敛时再开始新的辐射场重建结果,实验结果示于图6,可见在空间内

的辐射分布呈现出明确的梯度变化,其中基于对应色卡,辐射最强区域呈现出红色状态,低辐射区域呈现淡蓝色。

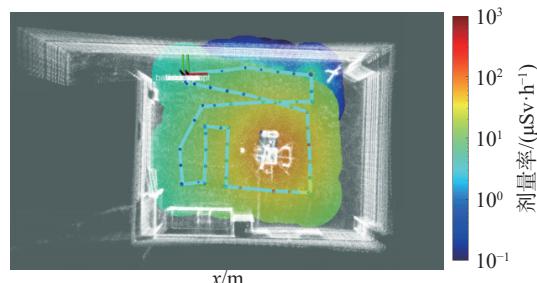


图6 辐射分布地图构建可视化展示

Fig.6 Visualization of radiation distribution map

3 结论

针对辐射监测需求搭建了一套智能化巡检机器人辐射分布地图构建系统,采用粒子滤波法估计放射源的位置和活度参数,再由估计结果通过注量公式计算辐射场分布,并与栅格地图相融合,对未知环境中的辐射分布进行可视化展示。当放射源为单点源时,粒子滤波算法进行辐射场重建的准确度要远高于反距离插值法和普通克里金法,与理论值的平均相对偏差约为16%。未来将开展三维辐射分布地图构建,并用点核积分软件模拟结果验证算法准确性,以便更准确和直观地获取和展示辐射剂量分布情况。

参考文献:

- [1] 赵成昆. 中国核电发展现状与展望[J]. 核动力工程, 2018, 39(5): 1-3.
Zhao Chengkun. Development status and outlook for nuclear power in China[J]. Nuclear Power Engineering, 2018, 39(5): 1-3 (in Chinese).
- [2] 韩飞. 核电巡检机器人底盘运动控制及路径规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- [3] Smith R, Cucco E, Fairbairn C. Robotic development for the nuclear environment: Challenges and strategy[J]. *Robotics*, 2020, 9(4): 94.
- [4] Wright T, West A, Licata M, et al. Simulating ionising radiation in gazebo for robotic nuclear inspection challenges[J]. *Robotics*, 2021, 10(3): 86.
- [5] Suzuki K, Kawabata K. Development of a robot simulator for decommissioning tasks utilizing remotely operated robots[J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2020, 32(6): 1292-1300.
- [6] Wang Z, Cai J. Inversion of radiation field on nuclear facilities: a method based on net function interpolation [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2018, 153: 27-34.
- [7] Anderson R B, Pryor M, Abeyta A, et al. Mobile robotic radiation surveying with recursive Bayesian estimation and attenuation modeling[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2020, 19(1): 410-424.
- [8] Ristic B, Morelande M, Gunatilaka A. Information driven search for point sources of gamma radiation[J]. *Signal Processing*, 2010, 90(4): 1225-1239.
- [9] 张敏. 未知放射源辐射场构造与智能随机搜索及其优化研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2016.
- [10] 王振宇, 黄伟奇, 孙健, 等. 泊松克里金算法在核辐射场重构中的应用研究[J]. 原子能科学技术, 2022, 56(8): 1690-1699.
Wang Zhenyu, Huang Weiqi, Sun Jian, et al. Reconstruction of nuclear radiation dose field using alternative Poisson-Kriging algorithm[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2022, 56(8): 1690-1699 (in Chinese).
- [11] West A, Tsitsimpelis I, Licata M, et al. Use of Gaussian process regression for radiation mapping of a nuclear reactor with a mobile robot[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 13975.
- [12] 阳康. 基于多源信息感知的辐射地图构建技术研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023.
- [13] 赛雪. 基于散乱数据插值方法的 γ 辐射场可视化技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2017.
- [14] Shan T, Englot B, Meyers D, et al. LIO-SAM: Tightly-coupled lidar inertial odometry via smoothing and mapping[J]. ArXiv e-Prints, 2020; arXiv: 2007.00258.