

# 基于四足机器人的EAST $\gamma$ 辐射巡检系统 开发

王文杰<sup>1,2</sup> 钟国强<sup>2,3</sup> 徐 坤<sup>3</sup> 杨亚军<sup>1,3</sup> 何锦妙<sup>1,3</sup> 李子昂<sup>1,2</sup>

1(安徽理工大学 淮南 232000)

2(合肥综合性国家科学中心能源研究院 合肥 230031)

3(中国科学院合肥物质科学研究院 合肥 230031)

**摘要** 全超导托卡马克核聚变实验装置(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)进行氘氘放电运行时会产生硬X射线、 $\gamma$ 射线和2.45 MeV聚变中子等辐射,在停机期间会产生感生 $\gamma$ 射线。为监测其辐射环境,EAST已经建立了一套基于固定点位的辐射监测系统。在此基础上,开发了一种基于四足机器人的移动辐射巡检系统,提升现有辐射监测系统的监测范围和灵活性。该系统集成了Unitree Go2四足机器人、三维激光雷达(3D LiDAR)与 $\gamma$ 剂量仪等硬件设备,搭建并开发了数据采集与导航巡检平台及局域通信网络等软件系统,实现了EAST大厅环境内“定位-建图-导航-辐射监测”的一体化作业。经现场测试,该系统软硬件运行良好,建图精度误差在0.996%,平均定位误差为4.7 cm,系统巡检完EAST大厅一圈耗时6 min 28 s,在EAST停机3.5 h后采集到了大厅内的 $\gamma$ 辐射剂量。结果验证了基于四足机器人的巡检方案在聚变装置复杂辐射环境监测与巡检任务中的可行性,为未来聚变装置辐射场的动态监测提供了新技术手段和实践参考。

**关键词** 聚变实验装置, 移动机器人, 自主导航, 同步定位与地图构建

**中图分类号** TL77, TP24

**DOI:** 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250430

**CSTR:** 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250430

## Development of an EAST $\gamma$ -radiation inspection system based on a quadruped robot

WANG Wenjie<sup>1,2</sup> ZHONG Guoqiang<sup>2,3</sup> XU Kun<sup>3</sup> YANG Yajun<sup>1,3</sup> HE Jinmiao<sup>1,3</sup> LI Ziang<sup>1,2</sup>

1(Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China)

2(Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230031, China)

3(Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract** [Background] The Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST) fusion device generates radiation including hard X-rays,  $\gamma$  rays, and 2.45 MeV fusion neutrons during deuterium-deuterium plasma operations, and induced  $\gamma$  rays during shutdown periods. [Purpose] This study aims to enhance the radiation monitoring system at EAST by adding a quadruped-robot mobile inspection system, increasing the coverage and flexibility. [Methods] A Unitree Go2 quadruped robot equipped with a 3D LiDAR and a  $\gamma$  dosimeter serves as the mobile inspection platform. Based on ROS 2, a Cartographer-based SLAM module and a Navigation2-based

国家自然科学基金(No.12575224)资助

第一作者: 王文杰, 男, 1998年出生, 2022年毕业于沈阳大学, 现为硕士研究生, 研究领域为机器人技术与辐射监测

通讯作者: 钟国强, E-mail: zhongggq@ipp.ac.cn; 徐坤, E-mail: xukun@ipp.ac.cn

收稿日期: 2025-11-29, 修回日期: 2026-03-02

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12575224)

First author: WANG Wenjie, male, born in 1998, graduated from Shenyang University in 2022, master student, focusing on robotics and radiation monitoring

Corresponding author: ZHONG Guoqiang, E-mail: zhongggq@ipp.ac.cn; XU Kun, E-mail: xukun@ipp.ac.cn

Received date: 2025-11-29, revised date: 2026-03-02

autonomous navigation module were developed to realize 2D grid mapping, real-time localization, global path planning and local obstacle avoidance. Meanwhile, a data acquisition program and a local wireless network were deployed to maintain wireless communication between the robot and the host computer, ensuring the returned  $\gamma$  dose-rate data and robot status information. **[Results]** Field tests show reliable hardware – software operation: the mapping error of 0.996%, the average localization error of 4.7 cm, a full inspection loop of the EAST hall of 6 min and 28 s. The linear and angular velocities of the quadruped-robot mobile inspection system is capped at  $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  and  $1.0 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ , respectively. **[Conclusions]** This study demonstrates the feasibility of the quadruped robot-based inspection solution for monitoring tasks in the complex radiation environment of fusion devices, providing a novel technical approach and practical reference for future dynamic radiation field monitoring.

**Key words** Fusion experimental device, Mobile robot, Autonomous navigation, Simultaneous localization and mapping

全超导托卡马克核聚变实验装置 (Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST) 在放电阶段会产生大量中子、 $\gamma$  射线以及硬 X 射线。在放电结束后, 中子消失, 但中子活化产生的放射性物质衰变, 会使聚变装置在停机阶段也残留一定  $\gamma$  辐射。EAST 根据自身的运行工况建立了一套辐射检测系统以实现辐射场监测以及人员安全评估<sup>[1]</sup>。当前, EAST 辐射监测系统主要依赖于固定点位的中子、 $\gamma$  探测器以及热释光/光释光累积剂量计<sup>[2]</sup>, 这类系统在稳定性方面具有优势, 但灵活性不足, 且空间覆盖范围有限, 难以动态监测不同运行阶段或维护任务下的不同位置的辐射监测需求。

近年来, 移动机器人已成为核辐射监测与核设施巡检的重要技术路线之一。2011 年日本福岛核事故发生后, 研究人员研发了 Quince 机器人, 通过在该履带式机器人上搭载常规数字剂量计、电荷耦合器件 (Charge-coupled Device, CCD) 摄像头、机械臂、三维激光雷达等设备<sup>[3]</sup>, 以无线/有线通信的混合组网方式, 手动遥控机器人进入了反应堆厂房内部高风险区域并执行了探索任务, 为后续的人员进入维护提供了可靠数据支持, 但最终该机器人因线缆缠绕问题导致无法收回<sup>[4]</sup>。在这之后, 更多研究者注意到了遥操作机器人在该领域的应用潜力, West 等<sup>[5]</sup>将  $\text{CeBr}_3$  闪烁体探测器和混合场分析仪所测到的辐射数据与机器人同步定位与地图构建 (2D-Simultaneous Localization and Mapping, 2D-SLAM) 所获取到的时空数据相结合, 利用高斯回归测量到的光子计数数据开展了辐射地图重建工作, 并在 JSI TRIGA Mark II 反应堆周围进行了远程遥控验证, 很好地探测到了环境中的辐射热点来源。Bird 等<sup>[6]</sup>开发了一款自主的地面辐射监测机器人 CARMA I, 该轮式机器人搭载了  $\alpha/\beta$  传感器、 $\gamma$  个人剂量仪、2D 雷达、红外传感器等, 在机器人操作系统 (Robot Operating System 1, ROS 1) 机器人操作系统

中间件的基础上简化了系统开发, 并成功在英国的塞拉菲尔德核电站实现了首次部署, 成功定位了  $\alpha$  放射源以及生成了该区域的几何与辐射测量地图。之后, CARMA II 系统进一步实现了对  $\alpha/\beta/\gamma$  的自主巡检与热力图生成, 并计划在未来让 CARMA II 成为塞拉菲尔德场址常态化运营的组成部分<sup>[7]</sup>。Groves 等<sup>[8]</sup>以 CSIRO 现有的导航栈作为定位与导航的基础, 通过将机载  $\gamma$  探测器获取的带时间戳的辐射测量数据映射到现有的二维代价地图中, 使其在执行任务期间能主动避让高辐射区域。以上研究都证明了移动机器人在核辐射环境中执行任务的可能性, 而随着技术的发展, 机器人平台与辐射传感器的集成日趋成熟, 未来还会有更多的移动机器人部署在相关核领域中。然而, 现有研究与应用仍主要面向核电站厂房、退役设施或辐射源事故现场, 机器人形态以轮式/履带式为主, 将四足机器人应用于托卡马克装置这一复杂辐射环境, 并集定位、建图、导航与辐射采集于一体的巡检研究仍相对缺乏。

面向 EAST 复杂环境结构下  $\gamma$  辐射场监测需求, 开发并验证了一套基于 Unitree Go2 四足机器人的移动辐射巡检系统, 该系统集成 3D LiDAR 和  $\gamma$  剂量仪, 基于 ROS 2 构建了以 Cartographer SLAM 框架为核心的实时定位与建图模块, 并采用 Navigation2 导航框架实现了全局路径规划与动态避障。该技术路线采用较为成熟的商业四足机器人作为硬件平台、基于开源工具库开发核心算法, 具有快速化、可复用、低成本等特点。通过现场实验, 定量评估了该巡检系统在真实 EAST 大厅环境下的建图精度、定位可靠性、导航稳定性以及辐射数据采集能力, 验证了四足机器人巡检方案在托卡马克复杂辐射环境中的可行性与有效性, 为未来聚变装置的动态辐射场监测与评估提供了一种创新的技术手段和实践参考。

# 1 EAST 辐射环境与移动巡检需求

## 1.1 EAST 大厅主机结构及辐射场特点

托卡马克装置及其主机大厅具有结构复杂、主机体积大、辅助系统多等特点。EAST 属于中等大小的磁约束聚变实验装置,主机部分高达 11 m,直径约 8 m,重达 400 T,主要由真空室、纵场/极向场线圈系统、内外冷屏、外真空杜瓦以及支撑系统等部件组成<sup>[9]</sup>,装置及实验大厅如图 1 所示。EAST 大厅长宽高大约为 33 m×28 m×23 m,四周建有 1.5 m 厚的生物屏蔽墙以及屏蔽水门,场内安装有各种子系统,包括低温系统、电源系统、诊断系统、中性束加热系统、离子回旋共振加热系统等<sup>[10]</sup>,其复杂的管线与设备使得大厅内部结构复杂,通行区域相对狭窄。



图 1 EAST 装置与实验大厅拍照(彩图见网络版)  
Fig.1 Snapshot of EAST tokamak and the hall (color online)

目前,EAST 上开展的是氦氖等离子体实验。在实验运行期间会产生 2.45 MeV 的中子。当高能中子撞击金属器壁时会导致金属材料活化,产生放射性同位素<sup>[11]</sup>;在低密度逃逸以及放电破裂等阶段,

高能逃逸电子会与装置器壁发生厚靶韧致辐射,产生硬 X 射线<sup>[12]</sup>。装置停机后虽不再有中子,但活化核素的衰变仍会产生感生  $\gamma$  辐射。此外,EAST 装置主机结构贯穿件多、束穿效应明显、实验大厅内结构复杂,造成实验大厅内的辐射分布呈显著的空间非均匀性<sup>[13]</sup>,对辐射监测系统的监测范围和灵活性提出了更高要求。

## 1.2 EAST 辐射监测系统与移动巡检需求

EAST 已具备较为完善的基于固定点位的辐射监测系统,其大厅内外的监测点位布局如图 2 所示,监测内容包括: $\gamma$ /中子的剂量实时监测与累积剂量监测。在实时监测方面,1~3 号点位部署在 EAST 大厅内,监测装置运行期间以及停机阶段的区域实时辐射水平;4~13 号点则设于 EAST 大厅外人员经常出入的敏感区域,监测环境中的实时辐射水平。由于 EAST 放电时长短、区域辐射水平高,在实验大厅内需要安装响应速度快、能量响应覆盖范围广的  $\gamma$ /中子探测器;针对 EAST 大厅外辐射水平接近环境本底的情况,需要安装灵敏度高的  $\gamma$ /中子探测器。具体而言,EAST 大厅内 1~3 号点采用了 AGM 型高压氙气电离室和 ANM 型 BF3 正比计数管来测量  $\gamma$  和中子剂量值,在大厅外 4~13 号点采用了 EGM 型高压电离室和 ENM 型 BF3 正比计数管来测量  $\gamma$  剂量值和中子剂量值。在  $\gamma$ /中子累积剂量监测方面,采用了光释光(Optically Stimulated Luminescence, OSL)剂量计与 CR-39 径迹探测器组成的 IT 胸章,设于上述 13 个点位进行累积剂量监测,并提供相关人员佩戴。当一个季度时间结束时,将其寄回第三方检测单位用于评估累积剂量<sup>[14]</sup>。

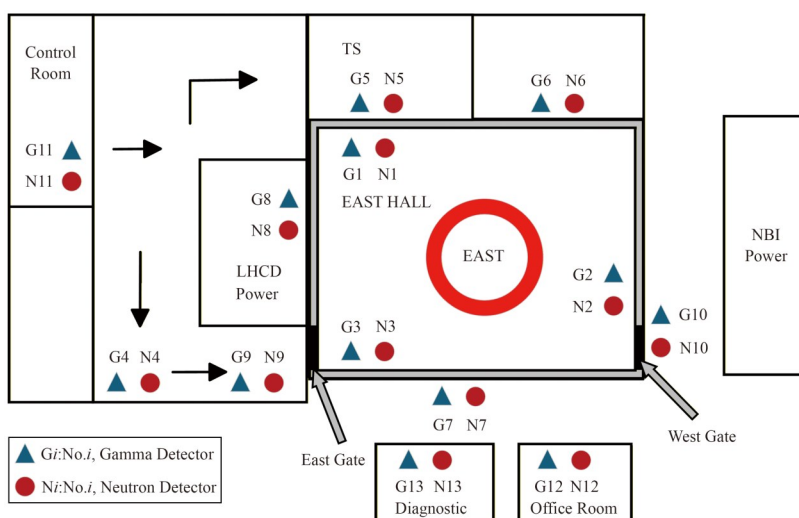


图 2 EAST 大厅监测点的布局(彩图见网络版)  
Fig.2 Layout of monitoring points in the EAST hall (color online)

EAST 辐射监测系统在基于固定点位的基础上实现了  $\gamma$ 、中子辐射的实时测量和累积剂量测量,为人员辐射安全提供了保障。但实验大厅的监测点位需求多且监测设备造价高,致使固定点位式的辐射监测系统无法覆盖整个 EAST 大厅,存在监测盲区、系统灵活性不足等固有局限。虽然人工巡检可一定程度上解决该问题,但其本身存在人员辐射暴露风险高、重复性差、效率低等明显不足。为此,在现有的典型辐射监测系统的基础上,开展了基于四足机器人的辐射巡检系统研究。

## 2 总体技术方案

### 2.1 总体方案

为实现 EAST 聚变辐射场景下的四足机器人辐

射巡检系统开发,该巡检系统的构建工作分为硬件集成和软件开发两部分,系统的总体组成结构如图 3 所示。

在硬件集成部分,采用成熟的 Go2 四足机器人平台,融合  $\gamma$  辐射监测传感器,构建一套轻量、灵活的移动巡检系统。Go2 四足机器人具备多自由度关节,可实现稳定的运动控制与姿态估计,支持外部传感器的集成以及基于 ROS2 框架下的系统扩展,外部负载最高达 12 kg,可根据任务需求灵活搭配设备。机器人外部搭载了 Jetson Orin NX 计算模块、Mid360 3D 激光雷达、路由器设备以及 HA1100 MED  $\gamma$  剂量检测设备,这些设备为机器人在聚变辐射环境下的定位建图、导航巡检、辐射测量和局域网通信提供了完整的硬件支持。

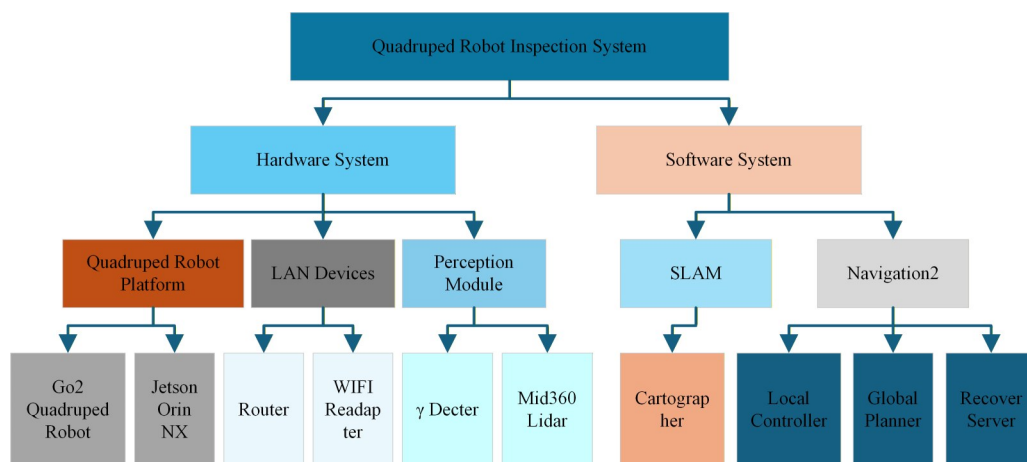


图3 基于四足机器人的聚变装置辐射场巡检系统总体组成模块框图(彩图见网络版)

Fig.3 Block diagram of the radiation field inspection system of fusion device based on quadruped robot (color online)

在软件层面,巡检系统需解决未知环境下的定位建图与导航问题。为此,采用了基于图优化的 Cartographer 算法,通过 Mid360 提供的雷达数据、IMU 数据以及机器人本体的里程计 Odometry 数据,实现高精度二维栅格地图构建与实时定位;在导航方面,采用了 ROS2 原生支持的 Navigation2 导航框架,搭配 Cartographer 输出的全局地图与定位信息,通过全局规划器、局部规划器、恢复器等插件的协同工作,实现机器人的全局路径规划、动态避障、自主恢复,保障机器人在大厅复杂环境中的稳定巡检。

### 2.2 巡检系统硬件集成

巡检系统的硬件集成主要由以下 4 个部分组成:Go2 四足机器人、Mid360 3D Lidar、辐射监测设备和局域网通信设备。该系统以 Go2 四足机器人作为核心,借助雷达与机身 IMU 实现对周围环境的感知以及自身姿态估计,利用辐射监测仪完成  $\gamma$  剂量

采集,并借助自组织局域网实现机器人端数据的上传以及远端 PC 的指令下发。四足机器人巡检系统的硬件组成如图 4 所示。

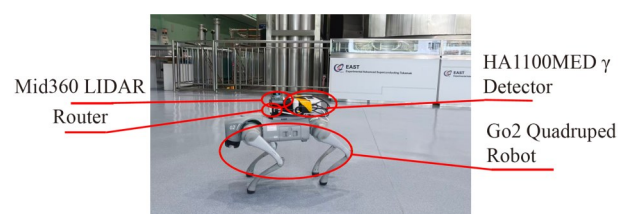


图4 四足机器人巡检系统外观图(彩图见网络版)

Fig.4 Appearance photo of the quadruped robot inspection system (color online)

#### 1) 四足机器人平台

巡检系统采用 Unitree Robotics 公司生产的 Go2 四足机器人作为移动承载平台,该设备拥有 12 个关节电机,能支持稳定的运动控制与机身姿态估计。

其内部集成有电源系统、机载惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)、嵌入式计算平台 Jetson Orin NX 等,为实时定位与建图、自主导航及传感器数据融合提供了硬件基础。Go2 四足机器人的具体参数见表 1。

## 2) Mid360 3D LiDAR

EAST 实验大厅是一个长方形的建筑,建筑内

表 1 Go2 四足机器人相关参数  
Table 1 Relevant parameters of the Go2 quadruped robot

| Go2 参数 Parameters                         | 参数值 Value  |
|-------------------------------------------|------------|
| 机体尺寸 Robot dimensions / cm                | 70×31×40   |
| 电机数量 Number of motors                     | 12         |
| 关节最大扭矩 Peak joint torque / N·m            | 45         |
| 载荷 Payload / kg                           | 8 (Max.12) |
| 运动速度 Locomotion speed / m·s <sup>-1</sup> | 0~3.7      |

表 2 Mid360 3D 雷达相关参数  
Table 2 Relevant parameters of the Mid360 3D LIDAR

| Mid360 参数 Parameter                              | 参数值 Value                                                        |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 扫描角度 Scan angle / (°)                            | 水平 360; 竖直 -7 ~ 52<br>Horizontal: 360; Vertical: -7 ~ 52         |
| 近处盲区 Near-field blind zone / m                   | 0.1                                                              |
| 点云输出 Point cloud output / points·s <sup>-1</sup> | 200 000                                                          |
| 点云帧率 Point cloud frame rate / Hz                 | 10                                                               |
| 探测距离 Detection range / m                         | 40 (@10% 反射率 10% reflectivity)<br>70 (@80% 反射率 80% reflectivity) |

## 3) $\gamma$ 剂量探测设备

由于等离子体运行期间 EAST 大厅内剂量率较高且放电时长较短,在放电结束后  $\gamma$  剂量率很快恢复到较低水平,因此要求探测器具备动态范围宽、响应速度快等特点,同时由于 Go2 四足机器人负载能力有限,探测器还需具备轻量化、自带电源等特点。基于以上考虑,巡检系统采用了 HA1100MED 作为  $\gamma$  剂量探测器,该设备采用了塑料闪烁体测量  $\gamma$  剂量,测量范围为  $0.01 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \sim 1 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ ,能量响应范围覆盖  $30 \text{ keV} \sim 3 \text{ MeV}$ ,且具有独立供电和轻量化的特性,支持 RS485、LAN 口、Wi-Fi 等多种数据传输方式,便于与机器人嵌入式平台进行高效集成。

## 4) 局域网搭建

Go2 机器人自带的软件开发工具包基于 Cyclonedds 通信中间件实现了机器人分布式系统中各设备之间高效、低延迟的数据通信,网络内的节点只需发布数据,Cyclonedds 就会负责局域网内设备之间的消息传递。为应对聚变装置现场潜在的电磁干扰与屏蔽墙对无线信号通信的影响,搭建了一套

面积长宽大约  $30 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ ,机器人通过的区域包括周围的人工通道以及部分靠近主机装置的空旷位置。为避免使用 2D 建图方案时在长走廊处的定位退化,所选择的激光雷达应具有点云密度高、探测范围远的特点。同时,由于机器人移动过程中会产生抖动,在采用纯 2D 雷达建图方案时,相邻的雷达数据帧之间会产生运动畸变,从而削弱激光匹配的约束,造成局部配准下降、建图边缘模糊的情况。因此,选择了 Mid360 3D Lidar 作为机器人的感知模块,并通过 ROS2 的 pointcloud\_2\_laserscan 包融合一定高度范围内的 3D 点云为 2D 点云,该方法既提升了点云密度、也扩大了机器人的视野,使得机器人可以看到更大范围内的障碍物,并且 Mid360 内部集成了 IMU 单元,便于融合 Lidar 数据提升在长走廊位置处的定位能力。基于此,巡检系统采用了 Mid360 3D LIDAR 雷达来实现高精度定位与建图功能。其具体参数见表 2。

高可靠性的自组织局域网通信方案。该方案包含三个部分:其一,四足机器人本体搭载独立供电的轻量化主路由器(Router),通过以太网与 NVIDIA Jetson Orin NX 计算平台相连;其二,实验现场部署无线中继器(Wi-Fi Repeater),用于增强主路由器的信号,保持大区域尺度下的稳定通信;其三,为避免屏蔽墙对无线信号的干扰,通过管线通道布置从远端 PC 到中继器端的以太网通信线路。

## 2.3 巡检系统软件设计

巡检系统的软件部分基于 ROS2 框架开发,以充分利用其分布式、跨平台、开源生态完备的特点。软件系统框架如图 5 所示:首先,HA1100MED  $\gamma$  剂量检测仪定期上报剂量数据,PC 端通过网络套接字接收数据并发布辐射剂量话题。Mid360 雷达点云数据、IMU 数据、机体里程计数据作为定位与建图的感知模块输入数据,通过 ROS2 的 CycloneDDS 分布式通信中间件发布到同一局域网下。3D 点云数据经 pointcloud\_to\_laserscan 降维成 2D 点云数据,送入 Cartographer 2D SLAM 算法,实现高精度全局地图

构建与定位。之后将Cartographer所输出的2D全局地图及位姿信息作为Navigation2导航框架的输入,并通过Go2\_twist\_bridge功能包将Go2的运控接口与ROS2的标准运动消息接口cmd\_vel桥接,使得Navigation2可驱动机器人移动,实现全局路径规划以及局部避障,并基于该导航栈应用,实现单点导航、多目标巡检,支撑Go2机器人沿预定路径执行巡检任务。

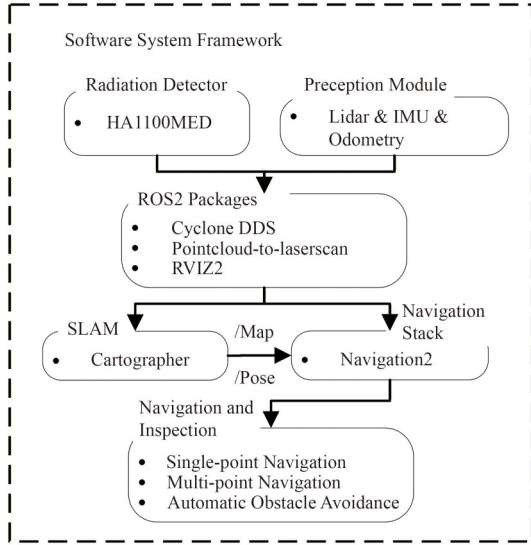


图5 四足机器人巡检软件系统框架  
Fig.5 Framework of software system for quadruped robot inspection

### 2.3.1 Cartographer算法

Cartographer通过将连续的雷达扫描点云匹配到局部子图来实现实时建图。雷达点云的一帧数据称为一扫描帧,子图由少量连续的扫描帧数据构建,当给定地图分辨率时,该地图会被离散为一张网格地图  $M: rZ \times rZ$ , 地图的每个栅格点可以视为一个映射到  $[P_{\min}, P_{\max}]$  之间的占据概率值,占据概率值越大,则认为该处有障碍物的可能性越大。

Cartographer的算法处理流程分为三个部分:前端数据处理、局部SLAM和全局SLAM。在前端处理部分,Cartographer算法接收雷达点云数据、IMU数据、里程计数据作为输入。其中,雷达点云数据经体素滤波后输入局部建图模块,IMU数据通过IMU跟踪器来估计重力方向和机器人姿态变化,从而将雷达数据投影到水平面上,里程计数据则用于外推位姿。当产生一扫描帧时,Cartographer会得到一组命中和未命中的集合,命中集取雷达点云命中点附近的最近栅格点,未命中集取雷达射线穿行途中所经过的栅格点,若集合中的栅格点之前未被观测过,Cartographer会为命中的和未命中的点赋予初始概

率值  $p_{\text{hit}}$  和  $p_{\text{miss}}$ , 已观测到的命中点则根据式(1)~(2)更新子图中命中栅格点的占据概率值。

$$\text{odds}(p_{\text{hit}}) = \frac{p_{\text{hit}}}{1 - p_{\text{hit}}} \quad (1)$$

$$M_{\text{new}}(x) = \text{clamp}\left(\text{odds}^{-1}\left(\text{odds}(M_{\text{old}}(x)) \cdot \text{odds}(p_{\text{hit}})\right)\right) \quad (2)$$

式中:  $x$  为某一网格点;  $\text{odds}()$  表示一件事情发生和不发生的概率比值;  $\text{clamp}()$  用于限制概率值不超过设定的上下界<sup>[15]</sup>。对于未命中的点,计算方法同理。

在局部SLAM部分,Cartographer会采用Ceres优化器的扫描匹配来对扫描帧进行非线性优化,最大化该帧扫描点落在子图中障碍物区域的概率,从而获得该帧的精确位姿估计,之后将这些优化后的扫描帧插入子图之中。当该帧仅与当前子图进行扫描匹配时,会导致累计误差逐渐增大。因此,在全局SLAM部分,当子图不再变化时,Cartographer会执行回环检测,周期性地将已匹配完成的扫描帧和子图进行匹配,若与子图匹配结果足够好,则执行稀疏图优化来校正整体轨迹<sup>[16]</sup>,进而抑制长期漂移,保证在长时间运行下的建图精度。

### 2.3.2 Navigation2导航

Navigation2 (Nav2) 是 ROS 2 中的核心导航框架,其系统结构如图6所示。Nav2通过行为树(Behavior Tree, BT)服务器来协调导航任务,每个子任务通过特定的异步服务器执行,如恢复服务器、控制服务器和规划服务器。当需要不同的导航策略时,只需修改或替换行为树文件,而不需重写整体业务逻辑代码<sup>[17]</sup>。

结合本文巡检系统的数据流,在利用Cartographer生成全局栅格地图后,该地图将作为Nav2的静态环境先验地图输入,当Cartographer完成环境重定位之后,还将为Nav2提供机器人位姿状态估计。在给定初始目标点后,BT Navigator接收导航请求并按行为树逻辑驱动各特定服务器协同工作,首先由全局规划服务器使用Dijkstra算法计算从当前点到目标点之间能避开障碍物的最短路径。之后,控制器服务器通过动态窗口法(Dynamic Window Approach, DWA)从当前速度状态  $(v, \omega)$  中采样生成一组可行的速度控制指令<sup>[18]</sup>,并根据期望优化行为设计评价函数,选择评分最高的速度控制指令执行,其初始评价函数如式(3)所示:

$$G(v, \omega) = \alpha \cdot \text{heading}(v, \omega) + \beta \cdot \text{dist}(v, \omega) + \gamma \cdot \text{vel}(v, \omega) \quad (3)$$

式中:  $G(v, \omega)$  为某一采样速度的得分;  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为可调节权重值;  $v$  代表平移速度;  $\omega$  代表旋转速度;

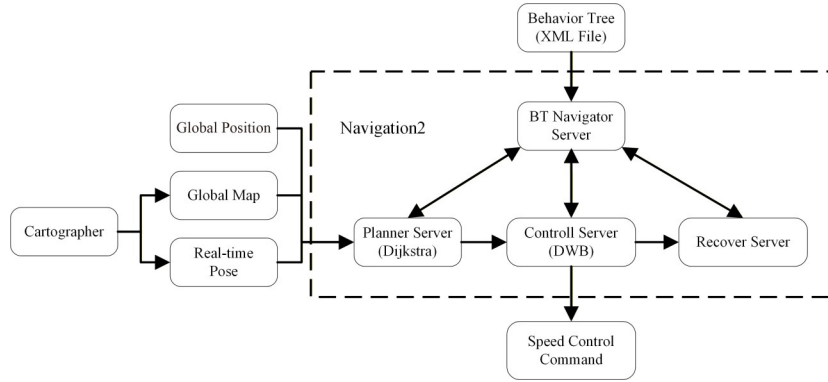


图6 导航策略流程  
Fig.6 Navigation strategy workflow

heading( $v, \omega$ )用于衡量机器人朝向与目标方向之间的偏差;  $\text{dist}(v, \omega)$ 表示与最近障碍物的距离;  $\text{vel}(v, \omega)$ 影响机器人的行进速度<sup>[19]</sup>。在基于以上评价的基础上, Nav2还会将实际障碍物周围膨胀为高代价区域, 为机器人留出足够安全的距离, 确保机器人在前进的途中不会撞上障碍物。在ROS2中, DWA的具体实现为基于动态窗口(Dynamic Window Based, DWB)控制器。

当在导航过程中出现错误时, 恢复控制器将操作机器人执行原地旋转、等待、清除代价地图等行为, 以帮助机器人脱离困境, 提升系统导航鲁棒性。

最终, Navigation2将驱动机器人完成从当前位置到目标位置的导航任务, 实现从定位建图到实际巡检的闭环控制, 为四足机器人的辐射监测任务提供运动控制与导航规划支持。

### 3 EAST大厅辐射巡检实验

为验证巡检系统在EAST复杂辐射环境下的真实性能, 本章开展了SLAM同步定位与建图实验、巡检实验以及剂量采集实验, 并对其建图精度、自主巡检效果、 $\gamma$ 剂量测量值进行了记录。EAST大厅实验环境如图7所示。

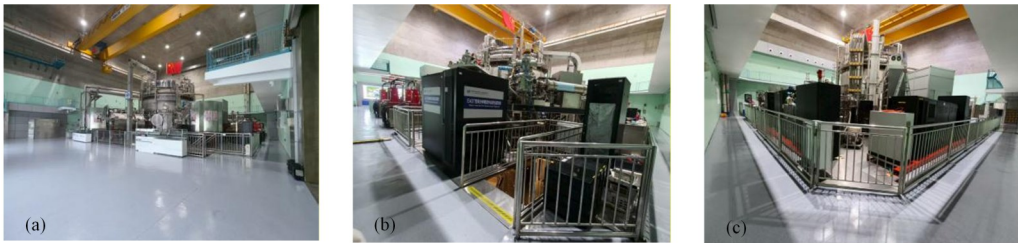


图7 EAST大厅环境照片 (a) 西北方向, (b) 西南方向, (c) 东南方向  
Fig.7 Snapshots of EAST hall environment (a) Northwest direction, (b) Southwest direction, (c) Southeast direction

#### 3.1 探测器性能评价

为评价巡检系统剂量仪HA1100MED的准确性, 本节将其与EAST已有性能良好的移动巡测仪FHZ672探测器进行了对比实验。实验内容如下, 将两个探测器置于 $^{60}\text{Co}$ 放射源半径0.5 m范围内, 待读数稳定时记录其在各个距离位置处测得的 $\gamma$ 剂量率, 实验环境如图8所示, 并按照式(4)计算两者相对误差。

$$RE = \frac{D_{HA} - D_{FHZ}}{D_{FHZ}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $RE$ 代表相对误差;  $D_{HA}$ 代表HA1100MED所测到的剂量率值;  $D_{FHZ}$ 代表FHZ672所测到的剂量率

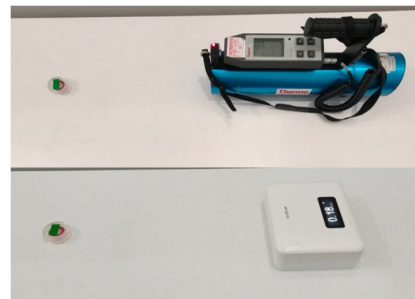


图8 探测器剂量率对比实验现场照片  
Fig.8 Photo of detector dose rate comparison experiment site

值。测量结果如表3所示, 在半径0.5 m范围内, HA1100MED与FHZ672的相对偏差为6.87%~

表3 探测器测量结果对比  
Table 3 Comparison of detector measurement results

| 距离<br>Distance / m | HA1100MED $\gamma$ 剂量率<br>HA1100MED $\gamma$ dose rate / $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ | FHZ672 $\gamma$ 剂量率<br>FHZ672 $\gamma$ dose rate / $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ | 相对误差<br>Relative error / % |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 0.10               | 0.47                                                                                      | 0.416                                                                               | 12.98                      |
| 0.15               | 0.35                                                                                      | 0.305                                                                               | 14.75                      |
| 0.20               | 0.28                                                                                      | 0.245                                                                               | 14.29                      |
| 0.25               | 0.23                                                                                      | 0.205                                                                               | 12.20                      |
| 0.30               | 0.20                                                                                      | 0.183                                                                               | 9.29                       |
| 0.35               | 0.18                                                                                      | 0.164                                                                               | 9.76                       |
| 0.40               | 0.16                                                                                      | 0.145                                                                               | 10.34                      |
| 0.45               | 0.14                                                                                      | 0.131                                                                               | 6.87                       |
| 0.50               | 0.13                                                                                      | 0.119                                                                               | 9.24                       |

14.75%，平均相对误差为11.08%。

### 3.2 SLAM 定位与建图实验

为评估基于 Cartographer 的 SLAM 方法在 EAST 大厅下的建图精度，系统在 EAST 主机大厅进行了实地测试。首先，操作四足机器人对 EAST 大

厅进行全覆盖移动扫描，利用 Cartographer 算法构建全局二维栅格地图，之后利用 RVIZ 中的距离计算插件测量地图内某一处的长度，将其与实际测量值进行对比。本实验对地图内 5 个物体的长度进行了测量，分别为柜体 m、柜体 n、防护门 o、栏杆 p、栏杆 q，其测量结果如表 4 所示。

表4 建图精度测量结果  
Table 4 Mapping accuracy measurement results

| 位置<br>Position | 实测值<br>Field-measured value / m | 图测值<br>Map-measured value / m | 绝对误差<br>Absolute error / m | 相对误差<br>Relative error / % |
|----------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| m              | 3.2                             | 3.23                          | 0.03                       | 0.93                       |
| n              | 3.0                             | 2.94                          | 0.06                       | 2                          |
| o              | 2.31                            | 2.29                          | 0.02                       | 0.87                       |
| p              | 5.29                            | 5.31                          | 0.02                       | 0.38                       |
| q              | 2.48                            | 2.46                          | 0.02                       | 0.80                       |

随后，为记录机器人在导航中的定位误差，本实验在已构建的地图上选取了 A、B、C 三个代表性位置作为验证点，控制机器人多次移动至这些点，记录其定位结果，并与初始位置进行比较。定位误差按式(5)计算。

$$LE = \frac{\sum_{i=1}^3 \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}}{3} \quad (5)$$

式中： $LE$  为定位误差； $(x_0, y_0)$  为初始位置坐标； $(x_i, y_i)$  为后续测量的定位坐标；建图结果见图 9，定位实验结果见表 5。

由表 4 和表 5 可知，所建的地图精度平均相对误差为 0.996%，定位的平均误差为 4.7 cm。所构建的二维栅格地图轮廓清晰，能基本反映大厅内的结构

特征，满足在 EAST 复杂环境下对执行巡检任务的建图精度与定位误差的要求。

### 3.3 Navigation2 导航与剂量采集实验

在构建全局地图后，对巡检系统的导航性能进行了测试。实验流程如下：首先使用 Navigation2 插件配置导航点，并由其向机器人下发运动控制指令，驱动机器人向目标点行进，之后记录机器人的沿途行走路径，巡检路线可见图 10。在 Navigation2 的 DWB 局部控制器的参数中，四足机器人的 X 轴方向线速度最小值设置为  $0.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，最大值为  $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，Y 轴方向无平移速度，最小角速度为  $0.0 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ，最大角速度  $1.0 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在设定好移动速度与巡检目标点的基础上，四足机器人巡检一圈耗时 6 min 28 s。

表5 Cartographer 定位实验结果  
Table 5 Cartographer localization results

| 标点<br>Point | 初始位置<br>Original position / m | 定位结果 Localization results / m |                 |                 | 定位误差<br>Localization error / m |
|-------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|
|             |                               | 1                             | 2               | 3               |                                |
| A           | (1.383,18.848)                | (1.353,18.907)                | (1.360,18.865)  | (1.342,18.857)  | 0.046                          |
| B           | (27.636,21.840)               | (27.653,21.874)               | (27.618,21.766) | (27.585,21.912) | 0.067                          |
| C           | (27.348,0.917)                | (27.367,0.946)                | (27.343,0.907)  | (27.383,0.931)  | 0.027                          |



图9 EAST大厅二维栅格地图  
Fig.9 2D grid map of the EAST hall



图10 四足机器人巡检路线  
Fig.10 Inspection route for quadruped robot

在EAST装置实验结束后的3.5 h,巡检系统成功采集到了在停机阶段的 $\gamma$ 剂量值以及机器人在map全局坐标系下的位置,远端PC与机器人端通信链路稳定,可持续收到机器人端所返回的状态信息以及 $\gamma$ 剂量值采集结果,其采集结果见表6。

#### 4 结语

本文提出了一套基于移动式四足机器人来测量辐射数据的方法。该方法以Go2四足机器人为核心,集成SLAM算法、Navigation2导航模块、 $\gamma$ 剂量测量与自组织局域网通信等关键技术,实现了四足

表6  $\gamma$ 剂量值采集结果  
Table 6  $\Gamma$  dose value acquisition results

| 标点<br>Points | 坐标值<br>Coordinate values / m | $\gamma$ 剂量值<br>$\Gamma$ dose values / $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ |
|--------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| A            | (27.827, 21.877)             | 0.21                                                                      |
| B            | (18.040, 22.066)             | 0.23                                                                      |
| C            | (8.306, 20.095)              | 0.21                                                                      |
| D            | (1.428, 18.339)              | 0.18                                                                      |
| E            | (1.973, 14.917)              | 0.19                                                                      |
| F            | (1.347, -0.396)              | 0.19                                                                      |
| G            | (9.760, 1.143)               | 0.15                                                                      |
| H            | (18.626, -1.548)             | 0.19                                                                      |
| I            | (24.111, -1.755)             | 0.18                                                                      |
| J            | (25.560, 5.309)              | 0.20                                                                      |

机器人在聚变装置下的“定位-建图-自主导航-辐射监测”的一体化作业。实验结果表明,基于Cartographer构建的EAST实验大厅二维栅格地图与EAST大厅的轮廓高度吻合,能准确反映大厅内的建筑结构,其平均相对建图误差为0.996%,平均定位误差为4.7 cm,机器人能沿导航点稳定前行并实施局部避障策略,在巡检系统的运行过程中采集 $\gamma$ 实时剂量数据,保持与远端PC的稳定通信。上述结果验证了四足机器人在EAST聚变装置下开展辐射巡检的可行性,展示了四足机器人在辐射监测与自主巡检方面所具有的工程应用潜力。

同时,面向未来聚变堆如燃烧等离子体实验超导托卡马克(Burning plasma Experimental Superconducting Tokamak, BEST)、国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)、中国聚变工程实验堆(China Fusion Engineering Test Reactor, CFETR)等更强的辐射场以及更复杂的现场场地限制,系统仍面临一些其他的风险,比如:在更高的 $\gamma$ /中子照射下,关键电子器件可能出现总电离剂量与位移损伤导致性能退化或失效<sup>[16,20]</sup>,进而影响四足巡检机器人的整体寿命;装置作业与停机检修阶段,可能存在活化粉尘或局部表面污染问题,四足机器人的足端与机体表面可能会携带污染物并导致二次扩散;托卡马克装置现场复杂金属结构以及大功率设备导致无线通信中断,或现场突发情况导致设备异常等。针对第一类问题:一方面,需要对关键部件如激光雷达、计算芯片、路由设备等进行耐辐照实验,测试其抗辐射性能,对易损伤的部件,采取使用薄铅材料等措施进行防护<sup>[21]</sup>。另一方面,利用机器人SLAM能获取时空信息的优势,对辐射场进行重建,并将辐射地图映射至机器人导航代价地图中,将降低累积辐射剂量作为

导航规划的约束之一<sup>[22]</sup>。对第二类问题：对机器人关键缝隙处采取密封设计，为足端/腹部等设计可拆卸的防护套或一次性覆盖件，定期采用表面污染检测仪检测表面污染情况，同时在导航策略上减少机器人在高剂量率/高风险区域的停留时间；针对第三类问题，需要深入展开在不同放电模式下的通信可靠性验证，并研究多链路冗余的通信方案，在Navigation2中为机器人设计安全策略，如当涉及危险区域时自动报警、任务暂停、回撤到安全区等。

综上，本文后续工作将重点围绕强辐射环境下器件的耐辐照测试、辐射场重构算法开发、冗余安全策略设计等方面开展，进一步提升本巡检系统的工程应用能力，以满足四足巡测机器人在现阶段EAST聚变装置的快速、高可靠性、可重复的巡检需求。

**作者贡献声明** 王文杰负责硬件设备集成、软件系统开发、数据收集、文章撰写；钟国强负责基金支持、文章审阅；徐坤负责论文结构指导、文章修改；杨亚军负责硬件集成协助；何锦妙负责实验协助，文章修改；李子昂负责设备保障与支持。

## 参考文献

- 李凯, 钟国强, 胡立群, 等. EAST托卡马克装置的核辐射监测系统[J]. 核技术, 2015, **38**(11): 110602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110602.
- LI Kai, ZHONG Guoqiang, HU Liqun, *et al.* Radiation monitoring system for EAST tokamak[J]. Nuclear Techniques, 2015, **38**(11): 110602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110602.
- 徐宇, 徐国盛, 钟国强, 等. EAST实验场所与人员累积辐射剂量监测[J]. 核技术, 2018, **41**(4): 040202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.040202.
- XU Yu, XU Guosheng, ZHONG Guoqiang, *et al.* Monitoring cumulative radiation dose of experimental sites and staff in EAST[J]. Nuclear Techniques, 2018, **41**(4): 040202. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.040202.
- Nagatani K, Kiribayashi S, Okada Y, *et al.* Redesign of rescue mobile robot Quince[C]//2011 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. November 1-5, 2011, Kyoto, Japan. IEEE, 2011: 13 - 18. DOI: 10.1109/SSRR.2011.6106794.
- Nagatani K, Kiribayashi S, Okada Y, *et al.* Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots[J]. Journal of Field Robotics, 2013, **30**(1): 44 - 63. DOI: 10.1002/rob.21439.
- 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**: 13975. DOI: 10.1038/s41598-021-93474-4.
- Bird B, Griffiths A, Martin H, *et al.* A robot to monitor nuclear facilities: using autonomous radiation-monitoring assistance to reduce risk and cost[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2019, **26**(1): 35 - 43. DOI: 10.1109/MRA.2018.2879755.
- Nouri Rahmat Abadi B, West A, Peel H, *et al.* CARMA II: A ground vehicle for autonomous surveying of alpha, beta and  $\gamma$  radiation[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2023, **10**: 1137750.
- Groves K, Hernandez E, West A, *et al.* Robotic exploration of an unknown nuclear environment using radiation informed autonomous navigation[J]. Robotics, 2021, **10**(2): 78. DOI: 10.3390/robotics10020078.
- Xu G S, Wan B N. Experimental advanced superconducting tokamak[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, **60**(23): 2157 - 2168. DOI: 10.1360/n972014-01235.
- Wu S T. An overview of the EAST project[J]. Fusion Engineering and Design, 2007, **82**(5 - 14): 463 - 471. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2007.03.012.
- 李成勋, 霍志鹏, 钟国强, 等. 磁约束聚变装置辐射监测系统概况[J]. 核技术, 2023, **46**(2): 020001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.020001.
- LI Chengxun, HUO Zhipeng, ZHONG Guoqiang, *et al.* Survey of radiation monitoring system for magnetic confinement fusion device[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(2): 020001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.020001.
- Zhang Y K, Hu L Q, Zhou R J, *et al.* Analysing the distribution of runaway electrons in the EAST tokamak based on SOFT[J]. Fusion Engineering and Design, 2021, **173**: 112924. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2021.112924.
- Zhou M J, Hu L Q, Huang L S, *et al.* Measurement of the radiation dose distribution in EAST hall based on thermoluminescence dosimeter[J]. Fusion Engineering and Design, 2020, **160**: 111977. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2020.111977.
- 周梦洁. EAST实验场所核辐射剂量场的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- ZHOU Mengjie. Investigation of nuclear radiation dose field in EAST experimental site[D]. Hefei: University of

- Science and Technology of China, 2020.
- 15 Hess W, Kohler D, Rapp H, *et al.* Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). May 16-21, 2016, Stockholm, Sweden. IEEE, 2016: 1271 - 1278. DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487258.
- 16 杜仕刚. 面向核辐射环境探测的多机器人协作研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.
- DU Shigang. Research on multi-robot cooperation for nuclear radiation environment detection[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020.
- 17 Macenski S, Martín F, White R, *et al.* The marathon 2: a navigation system[C]//2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). October 24 - January 24, 2021, Las Vegas, NV, USA. IEEE, 2021: 2718 - 2725. DOI: 10.1109/IROS45743.2020.9341207.
- 18 Fox D, Burgard W, Thrun S. The dynamic window approach to collision avoidance[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 1997, 4(1): 23 - 33. DOI: 10.1109/100.580977.
- 19 Macenski S, Moore T, Lu D V, *et al.* From the desks of ROS maintainers: a survey of modern & capable mobile robotics algorithms in the robot operating system 2[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2023, 168: 104493. DOI: 10.1016/j.robot.2023.104493.
- 20 Srour J R, Marshall C J, Marshall P W. Review of displacement damage effects in silicon devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(3): 653 - 670. DOI: 10.1109/TNS.2003.813197.
- 21 Nagatani K, Kiribayashi S, Okada Y, *et al.*  $\Gamma$ -ray irradiation test of electric components of rescue mobile robot Quince[C]//2011 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. November 1-5, 2011, Kyoto, Japan. IEEE, 2011: 56 - 60. DOI: 10.1109/SSRR.2011.6106756.
- 22 West A, Wright T, Tsitsimpelis I, *et al.* Real-time avoidance of ionising radiation using layered costmaps for mobile robots[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2022, 9: 862067. DOI: 10.3389/frobt.2022.862067.