

doi: 10.7690/bgzd.2023.01.017

未知环境下的消防机器人智能灭火技术

戴慎超¹, 顾保虎², 孙景富², 张克富², 陶卫军¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 南阳中天防爆电气有限公司机器人事业部, 河南 南阳 473008)

摘要: 针对机器人代替消防人员进行灭火救援的需求, 进行消防机器人自主火源寻找与智能灭火技术的研究。对消防机器人的结构与控制系统进行介绍, 明确其在未知环境下自主寻找火源与智能灭火的技术要求; 对消防机器人工作环境进行分析, 提出技术方案; 基于即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术实现消防机器人在未知环境中的自主行走与避障, 开发适合于机器人自主寻找火源与定向火源的方法与技术, 并通过实验进行有效性验证。实验结果表明: 该机器人能在未知环境中进行自主行走与越障, 其定位精度小于 0.4 m, 火源识别率大于 90%, 具有良好的应用前景。

关键词: 消防机器人; SLAM; 自主导航; 火源识别

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A

Intelligent Fire Fighting Technology of Fire Fighting Robot in Unknown Environment

Dai Shenchao¹, Gu Baohu², Sun Jingfu², Zhang Kefu², Tao Weijun¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Robotics Division, Nanyang Zhongtian Explosion-proof Electrical Co., Ltd., Nanyang 473008, China)

Abstract: Aiming at the demand of fire fighting and rescue by robots instead of firefighters, the research on autonomous fire source search and intelligent fire fighting technology of fire fighting robots is carried out. The structure and control system of the fire-fighting robot are introduced, and the technical requirements of searching for fire source autonomously and putting out fire intelligently in unknown environment are clarified; Based on simultaneous localization and mapping (SLAM) technology, the fire fighting robot can walk and avoid obstacles autonomously in an unknown environment, and the methods and technologies suitable for the robot to find and locate the fire source autonomously are developed, and the effectiveness is verified by experiments. The experimental results show that the robot can walk and cross obstacles autonomously in an unknown environment, the positioning accuracy is less than 0.4 m, and the fire source recognition rate is more than 90%, so it has a good application prospect.

Keywords: fire fighting robot; SLAM; autonomous navigation; fire source identification

0 引言

在一些火场灭火的场景中, 出动消防人员进行灭火存在一定的危险性, 一旦火情复杂, 很容易带来一些意想不到的人员伤亡。特别是在一些化工园区与煤炭生产场合等, 由于可能存在危险气体或化学物品的泄露或爆炸风险, 消防人员接触或暴露在这种环境中会威胁到他们的身体健康与人身安全^[1-2]。开发能辅助或部分替代消防人员进行消防灭火工作的消防灭火机器人, 能有效减少消防队员的伤亡并辅助消防队员进行灭火与火灾救援工作。

目前国内外已开发了一些消防机器人产品, 包括国内的 JZX-GL/A 型消防侦察机器人、JMX-LT50 型消防灭火机器人^[3]以及国外的 WALK-MAN 人形消防机器人^[4-5]、Bear 救援机器人^[6]等, 都已在消防

救援中得到实际应用。这些现有的消防机器人产品大多采用遥控的方式, 近年来开始有学者开发基于激光雷达与 IM 性测量单元的已知环境下的消防机器人自主定位与导航系统^[7], 但在消防灭火机器人的室外火源自主识别与定位技术方面尚未见公开报道。考虑到工业现场火灾爆发的突发性和时间紧迫性, 开发能在未知环境中进行自主导航、火源自主探测与定位的消防机器人智能灭火技术非常必要。

由此, 笔者针对消防机器人的智能灭火技术进行研究, 开发未知环境下的自主导航技术、室外火源自主识别与定位技术, 并提出与上述技术相结合的消防机器人智能灭火方法。在对消防机器人的结构与控制系统进行介绍的基础上, 明确消防机器人在未知环境下自主寻找火源与智能灭火的技术要

收稿日期: 2022-09-23; 修回日期: 2022-10-20

作者简介: 戴慎超(1996—), 男, 江苏人, 硕士, 从事移动机器人 SLAM 与自主导航技术研究。E-mail: 295665127@qq.com。

求；对消防机器人工作环境进行分析，提出消防机器人自主寻找火源与智能灭火的技术方案；基于即时定位与地图构建技术实现消防机器人在未知环境中的自主行走与避障，开发消防机器人自主寻找火源与定向火源的方法与技术；通过实验对所提技术进行有效性验证。

1 消防机器人功能与系统构成

1.1 消防机器人基本功能及改造

国内已有多款不同的消防机器人产品，主要结构与基本功能类似。笔者研发的 RXR-MC80BD-01 消防机器人采用履带式行走机构，搭载了水炮、喷淋装置、摄像机、环境监测传感器与无线通信装置等。机器人左右两侧各有一条履带，通过由驱动轮、导向轮、张紧轮以及承重轮组构成的履带驱动模块进行驱动，通过控制两侧履带上的驱动轮转速与转向来实现机器人的前进、后退与转向等运动功能。其中，布局在机器人后部的驱动轮半径为 150 mm，导向轮和张紧轮设置在机器人前部且与履带一起形成约为 45° 的前倾角。承重轮组中的每个轮子都安装有独立弹簧悬挂，用来压紧履带并缓冲载荷波动。其主要参数及性能指标如表 1 所示。

表 1 消防机器人主要参数及性能指标

性能指标	指标值	性能指标	指标值
自身质量 m/kg	750	制动距离 l_b/m	≤ 0.15
结构尺寸(长× 宽×高)	1 870×950×	整机牵引力 F_r/kN	≥ 4.5
$w \times h \times d/(\text{mm} \times$ $\text{mm} \times \text{mm})$	1 450	持续工作时间 t/h	≥ 5
爬坡角度 $\theta/(\text{°})$	≥ 25	喷淋降温装置	有
越障高度 h_o/cm	≥ 22	声光报警功能	有
侧倾稳定角 $\theta_r/(\text{°})$	≥ 30	防水性能要求	IP67
遥控距离 l_c/m	$\geq 1\ 000$	照明功能	有
直行速度 $v/(\text{m/s})$	≥ 1.55	拖着水带能力	2 条 80 水带 100 m
转弯直径 d_r/mm	$\leq 1\ 800$		

在此基础上，为实现机器人在未知环境中的自主寻找火源与智能灭火功能，在所开发的 RXR-MC80BD-01 消防机器人上进行了智能化改造。在机器人本体上增加了室外导航用激光雷达、基于 RTK 的 GPS 高精度定位系统、三光复合火源探测传感器与无线通信模块，用于实现机器人在未知环境中的自主导航、自主火源寻找与灭火，其外形如图 1 所示。

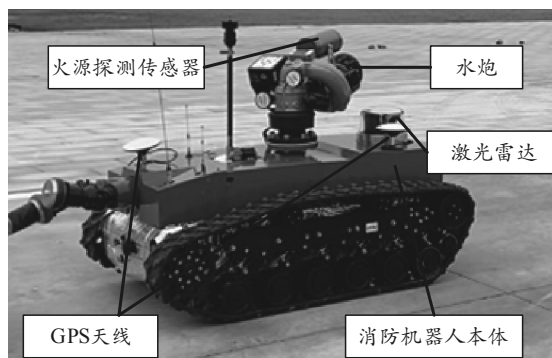


图 1 智能化改造后的消防机器人实物

1.2 消防机器人控制系统构成

智能化改造后的消防机器人控制系统采用高性能嵌入式工控机作为主控制器，通过工控机上搭载的 PCIE 板卡给出 PWM 脉冲信号给驱动电机并接收电机转动过程中产生的编码器脉冲。工控机对水炮的运动控制是通过基于 CAN 总线的 J1939 通讯协议实现的。在感知自身状态和周围环境方面，由高精度 GPS 获得的机器人当前位置和航向信息、激光雷达检测到的周围环境障碍信息分别通过 RS232 接口与网线接口发送到工控机。气体传感器、温湿度传感器和电源管理模块的信息由单片机板读取后通过 RS232 接口反馈给工控机，再由工控机通过无线数传模块传送到上位机遥控箱。此外，火源探测传感器的火源识别结果通过网口发送到工控机；同时，其实时视频信息及摄像头获取的视频信息一起通过无线图传模块传送到上位机遥控箱上，把现场实时情况提供给遥控操作人员。其控制系统硬件构成如图 2 所示。

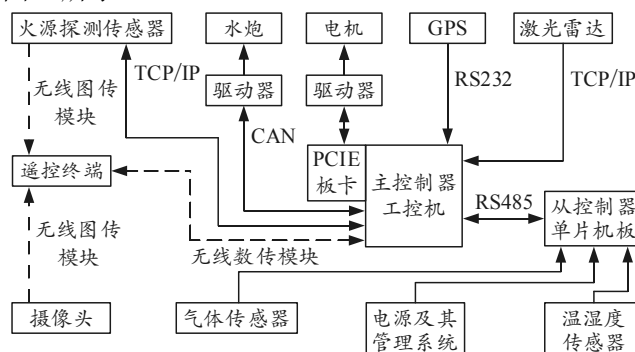


图 2 机器人控制系统硬件构成

2 消防机器人智能灭火方案

2.1 工作环境与工作任务

在化工园区或煤炭产业单位出现火灾后，容易进一步出现有害气体泄露或爆炸等连锁事件，对消防队员人身安全具有严重威胁^[8]。这种情况下，采

用消防机器人进入火灾区域进行灭火救援具有独特优势,可有效减少消防人员伤亡的危险。消防机器人还可设计成具有防爆功能的产品,在一些易燃易爆的石化行业现场,发挥替代消防人员进入现场的作用。

消防机器人在进入化工园区或煤炭产业单位后,其首要任务是寻找并定向火源。在此基础上,为机器人后部连接的消防软管提供高压水源或其他灭火介质,通过控制其搭载的水炮或其他消防装置即可进行消防灭火工作。

2.2 智能灭火方案设计

针对上述消防灭火机器人的工作场景,对其智能灭火方案进行设计。现有的灭火方案主要通过远程操作人员视频观察火源与遥控火炮转动来瞄准火源的方式。笔者开发的智能灭火方案中,由消防机器人进入未知火灾区域进行自主导航,把火源探测摄像头固定在水炮炮管方向;同时,进行自主火源探测、火源定向定位与灭火瞄准,大幅减少了原有灭火方式中所必须的人工干预依赖,提高了消防机器人瞄准精度与反应时间,在方法上具有良好的创新性与实用性。

由此,根据上述智能灭火方案,消防机器人必须具备如下 2 项能力:

1) 机器人在未知环境中进行自主行走与避障的能力。

考虑到火灾现场的复杂性与紧迫性,可基于室外激光雷达、高精度 GPS 定位系统与 SLAM 技术建立消防机器人在动态导航与自主避障功能,使其能在未知环境中实现自主行走与避障相结合,从而代替消防人员进入火灾现场。

2) 机器人自主寻找火源并确定火源位置与方位的能力。

选用国产三光复合火源探测器来对火源进行准确识别,并将其固定安装在具有 2 维转向功能的水炮炮管上且与水炮炮管保持同一方向。水炮炮管可实现 2 维转向,其在任意时刻相对于消防机器人本体的角度关系可实时检测得到,结合火源在三光复合火源探测器图像中的位置实现水炮对火源的定向,并利用三角形定位法对火源距离进行估算。

2.3 智能灭火技术指标确定

在根据上述方案进行灭火之前,需要结合灭火实践经验与工作原理,明确消防机器人在智能灭火

中的技术指标,如表 2 所示。

表 2 智能灭火相关的技术指标

技术指标	参数说明
水炮炮管角度检测误差 $e_d/(\circ)$	≤ 1
自主导航定位误差 e_n/cm	≤ 40
火源识别成功率 $R_f/\%$	≥ 90
火源定向精度 $a_f/(\circ)$	≤ 5

3 消防机器人自主火源识别与定向

3.1 火源识别原理与方法

火源识别主要通过三光复合火源探测传感器实现。该传感器搭载了可见光、红外光与红外热成像 3 个摄像头。在火源识别的过程中,3 个摄像头同时获取图像,对可见光与红外光摄像头的图像进行识别与处理,并结合红外热成像图像的处理技术^[9]实现火源识别与判定。

具体而言,三光复合火源探测传感器在同步得到 3 个摄像头不同图像的基础上,首先对可见光摄像头得到的 RGB 彩色图像与红外光摄像头得到的红外光谱彩色图像进行对比,当在 2 种图像上发现同时满足可见光对应的火源特征与红外光对应的火源特征的匹配要求时,初步判断该区域为疑似火源区域;针对疑似火源区域进一步根据设定的温度阈值对同时刻的红外热像图进行判断,此区域的平均温度达到或超过设定温度阈值则判定其为火源区域;通过图像切割^[10]从红外热像图中分割出高温区域,提取出该区域的边界进行像素点计算,得到火源区域的像素点面积特征与中心位置^[11]。在此过程中,通过对 3 个摄像头得到的同步图像进行综合处理与分析,同时从火源的可见光特征、红外光特征与温度特征 3 方面进行综合判断,能达到高准确率的火源识别。

三光复合火源探测传感器采用 TCP 通信机制把火源识别结果发送到工控机,其通信数据采用纯 json 字符串,信息输出主要包括以下 2 个结构体数据,如表 3 所示。

从上表中可见,三光复合火源探测传感器在识别到火源后能输出火源预警、火源温度、火源在图像中的面积大小与中心坐标等信息。

3.2 火源定向与距离估算方法

在火源检测的过程中,控制水炮左右转动并带动其搭载的火源探测摄像头同步转动,使得三光复合火源探测传感器能够在机器人正前方 180° 范围内进行火源探测。一旦火源探测传感器检测到图像

中存在火源后，输出火源区域在图像中的像素点面积特征、中心位置与平均温度等信息，并根据火源区域的中心位置完成火源定向；当输出的中心位置处于图像的中心区域时，水炮停止转动，从而使水炮指向火源区域中心位置，通过水炮反馈的位置信息和机器人实时航向信息来确定火源方向。

表 3 三光复合火源探测传感器结果输出

结构体	数据内容
火源警报数据 JSON_ALARM_AREA_S	火源大小 Are
	RED 强度值 Red
	GREEN 强度值 Green
	BLUE 强度值 Blue
	火源概率百分比 Pro
	正方形宽高 Bos
	火源区域图像 x 坐标 Pox
	火源区域图像 y 坐标 Poy
	区域标签 Lab
	区域标签 AreaLab
温度警报 JSON_TEMPERATURE_AREA_S	温度值 Temperature
	火源警报标志 AlarmFlag
	最高温度区域 x 坐标 Temperature Pox
	高温区域 y 坐标 Temperature Poy
	矩形框的宽 BoxWidth
	矩形框的高 BoxHeight
	火源区域图像 x 坐标 Pox
	火源区域图像 y 坐标 Poy

由于三光复合火源探测传感器的输出信息中不包含火源与摄像头之间的距离信息，要获得此距离信息可通过多点检测来进行计算。此处假定火源的高度相对于此距离较小，从而 3 点可大致定位在同一个水平面内进行计算。通过如图 3 所示的三角形定位法来估算火源中心与机器人之间的距离，并结合机器人的位置坐标得到火源的方位信息。

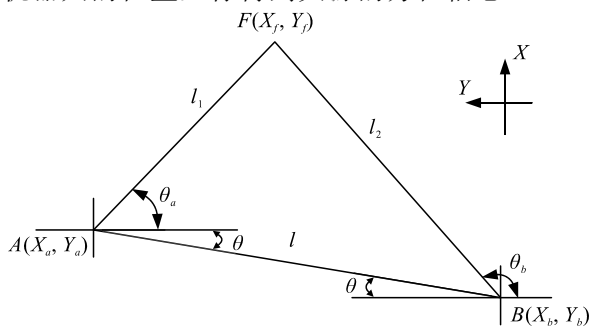


图 3 火源中心三角定位

如图 3 所示，假设火源中心位置用点 $F(X_f, Y_f)$ 表示，机器人首先在点 A 位置对火源识别并确定火源方向，然后在点 B 位置再次进行火源识别和定向，以此构造一个定位三角形。其中，点 A 和点 B 在全局地图中的坐标已知，分别为 (X_a, Y_a) 和 (X_b, Y_b) ，角度 θ 为线段 AB 与 Y 轴的夹角，从而能够确定线段 AB 的长度 l 和 θ 的值，可表示为：

$$l = \sqrt{(X_a - X_b)^2 + (Y_a - Y_b)^2}; \quad (1)$$

$$\theta = \arctan(|X_a - X_b| / |Y_a - Y_b|). \quad (2)$$

首先通过 GPS 定位系统来得到机器人航向角与水炮反馈的炮管相对于机器人航向的转角，由此 2 个角度可计算出机器人分别在点 A 和点 B 位置时炮管与 Y 轴之间的夹角 θ_a 和 θ_b 的值。进一步，根据图 3 所示的几何关系，可计算出图 3 中 $\triangle ABF$ 中的 3 个内角 $\angle A$ 、 $\angle B$ 与 $\angle F$ ，如式(3)—(5)所示。

$$\angle A = \theta_a + \theta; \quad (3)$$

$$\angle B = \pi - (\theta_b + \theta); \quad (4)$$

$$\angle F = \theta_b - \theta_a. \quad (5)$$

在 $\triangle ABF$ 中，利用正弦定理就能计算出 AF 距离 l_1 和 BF 距离 l_2 ，从而完成火源距离的估算， l_1 和 l_2 可表示为：

$$l_1 = l \cdot (\sin(\theta_b + \theta) / \sin(\theta_b - \theta_a)); \quad (6)$$

$$l_2 = l \cdot (\sin(\theta_a + \theta) / \sin(\theta_b - \theta_a)). \quad (7)$$

最后，可通过式(6)或(7)求出火源在全局地图中的位置坐标 (X_f, Y_f) ，如式(8)—(9)所示。

$$X_f = X_b + l_2 \cdot \sin(\theta_b); \quad (8)$$

$$Y_f = Y_b - l_2 \cdot \cos(\theta_b). \quad (9)$$

式(8)、(9)中点 B 坐标 (X_b, Y_b) 由 GPS 定位得到，变量 θ_b 可计算得到， l_2 由式(7)计算得到。由此可见，通过使机器人在 2 点对火源进行识别与定向，可通过式(8)和(9)计算得到火源所在点 F 的坐标，也可进一步求出火源所在点 F 到 A 或 B 的距离。

4 消防机器人动态导航与灭火技术

4.1 消防机器人动态导航功能的实现

消防机器人动态导航采用 C++ 语言编程，基于机器人操作系统 (robot operating system, ROS)^[12-13] 平台实现。ROS 属于一种广泛应用于机器人控制的分布式操作系统，在 ROS 上开发的机器人动态导航软件模块由多个独立的节点组成整个机器人控制软件框架，节点和节点之间采用话题通信机制和服务通信机制，由 ROS 平台内置的节点管理者 Master 进行统一管理。

消防机器人动态导航的软件框架如图 4 所示。激光雷达节点用于获取激光雷达测距数据；GPS 里程计节点用于获取 GPS 数据并转换成自主导航需要的里程计信息；底盘控制节点用于接收运动指令，并控制驱动电机来实现机器人的运动。在动态导航

系统中，SLAM 建图节点通过激光雷达获取环境特征信息和 GPS 获取的定位信息采用 Gmapping 算法对环境地图实时构建；导航节点在 SLAM 构建的地图进行路径规划，采用 A*算法搜索出一条全局路线，在此路线的基础上使用动态窗口算法(dynamic window approach, DWA)^[14-15]根据周围环境状态进行局部规划使机器人在贴合全局路线的同时能避开周围障碍物，下发局部路线的速度控制指令，该指令被底盘控制节点接收，并驱动机器人底盘按照规划路线行驶，完成其在未知环境中的自主导航。

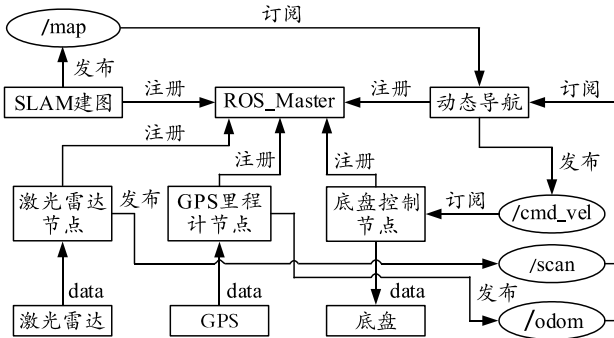


图 4 消防机器人动态导航软件框架

4.2 消防机器人智能灭火方法

消防机器人智能灭火建立在动态导航的基础上，并结合自主避障、火源识别与定向技术来开展。首先，根据园区建筑地图向消防机器人发布目标点位，使机器人环绕园区进行自主 SLAM 探索^[16-17]，同时进行自主避障、火源识别与定向。消防机器人发现火源后，记录机器人此刻的位置与航向，获取火源预警、火源温度、火源在图像中的面积大小与中心坐标等信息，并把预警信息发送到远程遥控终端；此后，机器人继续行走一段设定距离后重新进行火源识别与定向，并结合第 1 次发现火源的状态信息估算火源距离。当火源距离超出水炮射程范围时，提示操作人员发布新的目标使机器人导航至目标位置后重新进行火源识别定向与火源距离估算；当火源距离进入水炮射程内时，通过调节水泵压力来控制水炮射程进行灭火工作；同时，水炮按设定程序进行小幅度左右摆动，来扩大水流的覆盖范围，预防由于风向与角度误差等导致的水流方向偏差。其智能灭火流程如图 5 所示。

5 实验与分析

5.1 火源识别实验

在火源识别实验中，燃烧废弃木材与纸板形成火源，设置在消防机器人前方约 40 m 位置处。等

待其充分燃烧至火源大于 0.3 m×0.3 m 后，控制水炮在正前方 180°范围内往复摆动的同时，使得水炮炮管上搭载的三光复合火源探测传感器对火源进行识别，读取传感器反馈信息来验证火源识别的准确率。实验现场如图 6 所示，重复实验 10 次的实验数据如表 4 所示。

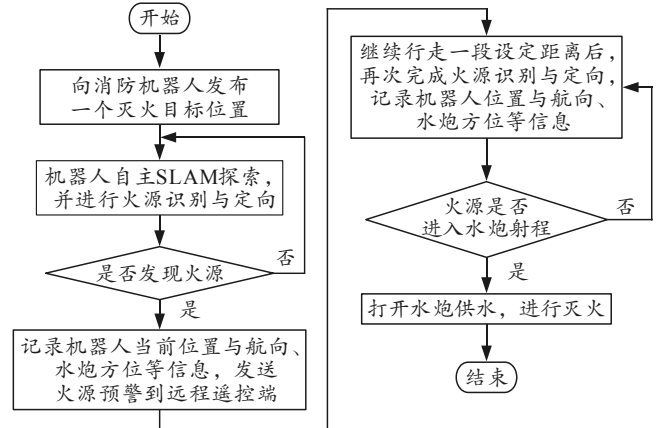


图 5 消防机器人智能灭火工作流程



图 6 火源识别与定位实验现场

表 4 火源识别实验数据

实验编号	温度/℃	像素个数	中心坐标(x, y)
1	253	15 341	(616, 487)
2	274	16 746	(631, 510)
3	338	21 350	(644, 525)
4	290	18 068	(637, 512)
5	305	18 976	(637, 506)
6	268	16 080	(627, 492)
7	296	18 784	(632, 514)
8	315	18 925	(635, 517)
9	320	19 762	(638, 503)
10	283	17 045	(629, 496)

由上表数据可见，识别出的火源温度在 250~350 ℃之间，一般木材燃烧温度在 400 ℃以上，通常为 600 ℃左右。考虑到热辐射会随着距离增大而减小，其实验数据合理。

三光复合火源探测器的信息反馈频率大约为 0.67 Hz，此外水炮的摆动速度范围为 5~20 (°)/s。实验结果表明，在火源大小满足要求的情况下，其火源识别准确率达到 100%，高于所设定的 90% 的指标。

5.2 机器人避障与定位实验

为验证消防机器人的避障性能与定位精度，在动态导航的过程中进行机器人避障与定位实验，实验方法如下：机器人在初始位置(0, 0)，给定一个目标点位(x, y)，在 2 个位置间设置 2~3 个障碍物，要求机器人在自主导航中避开设定的障碍物，并自主导航至目标点。然后，测量机器人的实际到达位置，通过对比给定目标位置验证机器人的定位精度。重复实验 10 次，机器人在此过程中的避障过程如图 7 所示，定位实验数据如表 5 所示。

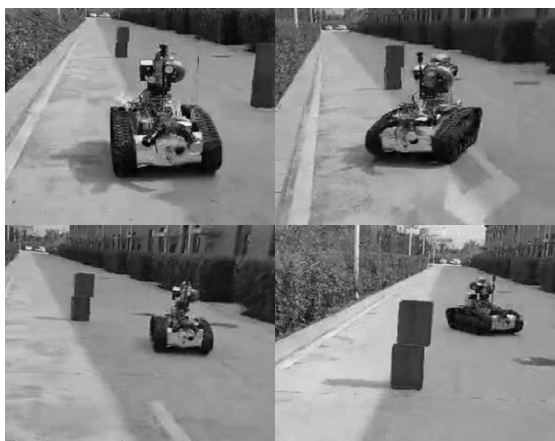


图 7 消防机器人避障实验现场

表 5 定位实验数据

实验编号	目标点坐标(x ₀ , y ₀)	实际坐标(x, y)	误差/m
1	(10, 1)	(9.77, 0.70)	0.38
2	(10, 1)	(9.75, 0.70)	0.39
3	(10, 1)	(9.68, 0.90)	0.34
4	(10, 1)	(9.74, 0.75)	0.36
5	(10, 1)	(9.72, 0.80)	0.34
6	(20, 2)	(19.765, 2.25)	0.34
7	(20, 2)	(19.73, 2.04)	0.27
8	(20, 2)	(20.28, 1.80)	0.34
9	(20, 2)	(19.84, 1.73)	0.31
10	(20, 2)	(19.92, 1.88)	0.14

由上表中数据可见，机器人在动态导航中的定位误差在 X 方向和 Y 方向上在 ±0.4 m 内，此定位精度能保证消防机器人动态导航的过程中实现智能灭火的功能。

5.3 智能灭火实验

在智能灭火试验中，消防机器人首先进行园区环境的自主 SLAM 探索并进行火源识别与定向，检测到火源后导航至灭火点进行第 2 次的火源识别与定向，通过三角形定位法确定火源在全局地图中的位置，同时确定火源与灭火点之间的距离，调整水炮俯仰角并配合后方水泵水压大小控制灭火距离来进行灭火。实验现场如图 8 所示，重复实验 5 次的实验数据如表 6 所示。



图 8 消防机器人灭火实验现场

表 6 自主灭火实验数据

实验编号	第 1 次火源定向误差/(°)	第 2 次火源定向误差/(°)	火源与灭火点估算距离/m	火源与灭火点实际距离/m
1	2.1	1.8	20.54	18.78
2	3.0	2.0	18.59	18.62
3	1.8	2.2	20.81	18.40
4	3.2	2.4	22.63	18.78
5	2.5	2.2	19.21	18.65

由上表数据得知，在 5 次实验中，根据检测数据进行计算得到的火源定向精度在 3° 以内，距离估算误差最大值约为 2 m。通过此距离估算数据并考虑其误差来确定水炮灭火时的位置，以防止火源距离消防机器人太远从而超出水炮射程，而水炮的实际射程可通过控制水泵水压大小来进行调节。实验中使用的水炮最大射程在 60 m 左右，通过此方法判断火源距离是否进入水炮射程具有一定的创新性与实用价值。

综上所述，该实验验证了火源识别定向方法和三角形定位法估算火源距离的可行性。

6 结束语

根据机器人在具有爆炸可能性的化工园区或煤炭产业单位等火灾现场代替消防人员进行灭火救援这一需求，开发了消防机器人自主火源寻找与智能灭火技术。在对消防机器人的结构与控制系统进行介绍的基础上，明确消防机器人在未知环境下自主寻找火源与智能灭火的技术要求；对消防机器人工作环境进行分析，提出消防机器人自主寻找火源与智能灭火的技术方案；基于 SLAM 技术实现消防机器人在未知环境中的自主行走与避障，开发适合于机器人自主寻找火源与定向火源的方法与技术；通过实验对该技术进行有效性验证。实验结果表明：该机器人自主火源寻找与智能灭火技术能使消防机器人在未知环境中进行自主行走与避障，其定位精度小于 0.4 m，火源识别率大于 90%，能实现自主火源寻找与智能灭火，具有良好的应用前景。