DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)08-0127-05

基于 ROS 的智能消毒机器人路径自动导航方法

李 炜[1], 黄 倩[2]

(1.武汉大学人民医院 信息中心, 武汉 430060; 2.武昌职业学院, 武汉 430060)

摘 要:针对智能消毒机器人运行环境复杂、控制器性能和障碍物给机器人路径的自动导航带来的诸多问题,提出基于机器人操作系统(robot operating system, ROS)的智能消毒机器人路径自动导航方法。采用分层控制理念,设计由用户层、决策层、执行层和设备层构成的四级硬件系统,明确各层级的硬件选型、参数及功能定位。基于模块化设计思路,开发消毒目标定位、直线路径规划、转弯路径规划的软件程序,在程序中融入改进的 S 形轨迹规划技术,将软件程序添加到硬件系统中完成智能消毒机器人自动导航。实验结果表明,所提方法的导航时间稳定在 35 s 左右,导航精度更稳定。可完全避开导航路径中的障碍物,对消毒目标的定位结果精准,无偏移或错误情况。能满足复杂环境下智能消毒机器人的自动导航需求,为智能消毒机器人的导航系统设计提供了技术参考。

关键词:机器人操作系统;分层控制平台;坐标映射;S 形轨迹规划;转弯路径规划;转换矩阵;目标定位;避障导航

中图分类号: TP18;TP242;R187 **文献标志码**: A **文章编号**: 1003-7241(2026)08-0127-05

Path automatic navigation method of intelligent disinfection robot based on ROS

Li Wei[1], Huang Qian[2]

(1. Information Center Renmin Hospital of Wuhan University, Wuhan 430060, China;
2. Wuchang Polytechnic College, Wuhan 430060, China)

Abstract: A path automatic navigation method for intelligent disinfection robots based on robot operating system (ROS) is proposed to address the many problems caused by the complex operating environment, controller performance, and obstacles on the robot's path. Adopting the concept of hierarchical control, a four level hardware system is designed consisting of user layer, decision layer, execution layer, and device layer, clarifying the hardware selection, parameters, and functional positioning of each level. Based on the modular design concept, software programs are develops for disinfection target positioning, straight path planning, and turning path planning, integrates improved S-shaped trajectory planning technology into the program, and the software program is added to the hardware system to achieve automatic navigation of intelligent disinfection robots. The experimental results show that the navigation time of the proposed method is stable around 35 seconds, and the navigation accuracy is more stable. It can completely avoid obstacles in the navigation path and accurately locate the disinfection target without deviation or errors. It can meet the automatic navigation requirements of intelligent disinfection robots in complex environments, providing technical reference for the design of navigation systems for intelligent disinfection robots.

Keywords: robot operating system; layered control platform; coordinate mapping; S-shaped trajectory planning; turning path planning; transformation matrix; target positioning; obstacle avoidance navigation

随着智能家居的发展,人们对智能消毒机器人路径自动导航系统不仅要求导航路径精度高,还要求其具有优秀的避障功能[1]。因此对智能消毒机器人路径自动导航系统做出加强改造一直是工作人员关注的重点问题。我国机器人产业处于智能化时代,随着服务机器人[2]的大力发展,意味着我国在机器人医疗水平、智能监测等方面具有重大突破。通过上述分析不难发现,智能消毒机器人路径自动导航系统的研究不仅是当前急需解决的关键问题,更已成为备受关注的热门研究方向。

李秀智等[3]采用灰度值算法和最大类间差法对智能机器人采集的路径图像作出分割处理,然后结合动态阈值和形态学原理消除图像中的噪声,最后根据均值法提取图像特征,并利用随机抽样一致法对路径图像实行线性拟合。该方法没有设计出人机交互平台,导致导航时间过长、效率低。罗强等[4]在智能机器人导航技术的基础上建立了模拟障碍物的功能模型,并且相应地搭建动态感应为主的物理感知平台。然后在人工势场法中引入机器人运动时间和引力得到人工势场模型,完成智能机器人路径自动导航。该方法没有获取准确的消毒目标位置,也没有设计 S 形路径规划,导致导航精度低、避障能力差。郭明阳等[5]利用智能机器人传感器获取户外地图航迹点,然后使用激光摄影法获取周围环境并构建全局栅格图,在栅格图中使用改进的最短路径算法搜寻全局路径,最后设计预测控制模型完成智能机器人路径的自动导航。该算法没有

收稿日期:2025-05-16;**录用日期**:2025-07-14

作者简介:李 炜(1981—),男,硕士,工程师,研究方向为医院信息管理、数据库应用。

引用本文:李炜,黄倩. 基于 ROS 的智能消毒机器人路径自动导航方法[J]. 自动化技术与应用,2026,45(8):127-131. (Li Wei, Huang Qian. Path automatic navigation method of intelligent disinfection robot based on ROS[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(8): 127-131.)

规划智能消毒机器人的转弯路径,导致避障能力差。也没有利用激光雷达获取消毒目标位置,导致目标定位效果差。

为了解决上述方法中存在的问题,通过 ROS 对智能消毒机器人路径自动导航系统进行优化设计。

1 基于分层控制的模块设计

基于 ROS 的智能消毒机器人路径自动导航系统,首先利用分层控制理念将导航系统作出分层设计,整体框架如图 1 所示。

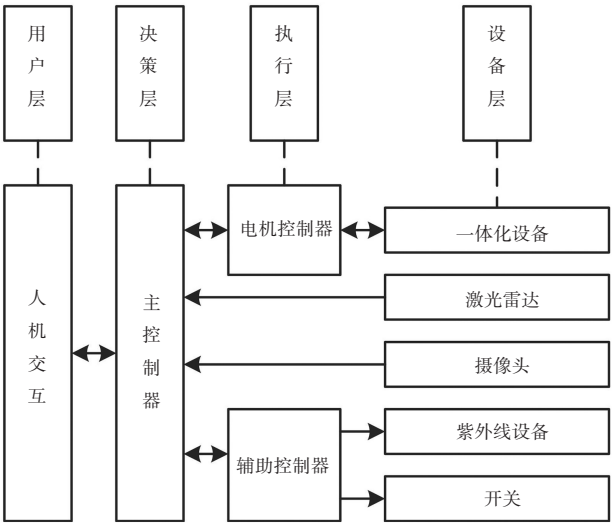


图 1 分层控制平台

Fig. 1 Hierarchical control platform

1) 用户层模块。作为基于 ROS 的智能消毒机器人路径自动导航系统硬件平台的基础层,用户层主要负责接收用户传来的消息指令,然后将消息指令传递给决策层。并且用户层模块配备麦克风,可以实现语音识别功能,起到人机交互[6]的决定作用。

2) 决策层模块。作为基于 ROS 智能消毒机器人路径自动导航硬件平台的核心模块,决策层主要负责语音识别、目标定位、路径导航规划等重要功能。使用激光传感器采集环境的点云数据供机器人建图与定位,机器人采用 rplidarA1 型号传感器,测距半径为 0.15~12.00 m,测距分辨率为 0.5°,扫描频率为 5~10 Hz,机器人采用位置传感器检测自动导航中的诱导线信号,获得路径信息,当智能消毒机器人处于启动状态时,主控制器接收用户层发来的消息指令,结合设备层激光雷达发来的周边环境信息,决策层模块的结构如图 2 所示。

3) 执行层模块。执行层中的电机控制器和辅助控制器具备成本小、能耗低等优势。当基于 ROS 的智能消毒机器人路径自动导航系统运行时,执行层负责接收决策层发送来的控制要求,包括控制电机的开闭、调整机器人速度、消毒管的开闭等。电机编码器选用旋转编码器,用于计算设备的旋转周期数、推断设备的移动速度、机器的具体位置等;下位机型号为 STM32S103-ARM M3 单片机,用于自动导航命令的发布,并向系统提供电力能源,控制上位机正常运行;驱动器接受指令后,会调整电机的转速,控制设备的运动,调节设备的运行状况并设计出最佳的运动路线,能够有序完成自动导航等工作。

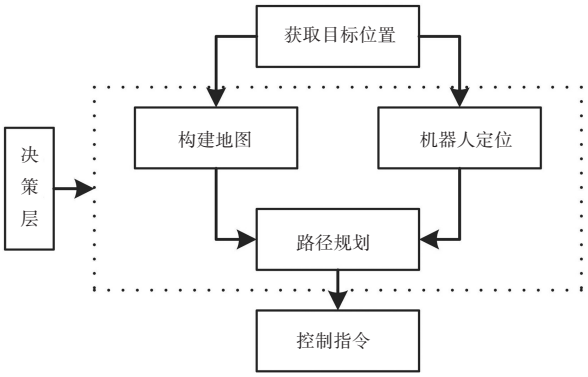


图 2 决策层模块构架

Fig. 2 Structure of decision-making layer module

4) 设备层模块。基于 ROS 的智能消毒机器人,采用先进的全方位滑行结构,具备更灵活的运动能力。设备层模块由一体化设备、激光雷达、摄像头、等设备组成。激光雷达通过发射和接收参数,其设备负责采集消毒目标周围环境信息。雷达型号为 rplidarA1,用于推算距离,避免与周边物体发生碰撞;摄像头负责获取用户人脸信息,全角度进行检测,且在 8 m 范围内,通过摄像头确定目标点和导航过程中机器人的运行路径。

2 软件设计

针对智能消毒机器人路径的自动导航仅仅设计出分层平台的模块不足以实现路径的自动导航,需要与软件系统相结合。

2.1 消毒目标点定位

1) 基于 ROS 的智能消毒机器人软件设计,首先将消毒目标点的位置投入到机器人坐标系中,并引入物理坐标系。需转换坐标,公式为

$$\boldsymbol{U} = [l, w] = [x, y, z, \alpha, \beta, \chi] \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{U}$ 表示的是坐标转换关系;l 为消毒目标位姿变化角度;w 表示平移长度;x、y、z 分别表示物理坐标下相平移长度;α、β、χ 分别表示旋转角度。

2) 将基于 ROS 的智能机器人消毒目标点坐标固定,那么目标点对应机器人的原点 $\boldsymbol{F}$ 可以用如下公式表示,其中 $\boldsymbol{F}'$ 为消毒目标点坐标,$\boldsymbol{S}$ 表示由旋转角度构成的矩阵。

$$\begin{cases} \boldsymbol{F} = l + \boldsymbol{F}' \cdot \boldsymbol{S} \\ \boldsymbol{F}' = [x, y, z] \end{cases} \tag{2}$$

3) 计算出消毒目标点在智能消毒机器人坐标系中的虚实映射[7]点 $\boldsymbol{F}''$, 公式为

$$\boldsymbol{F}'' = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\chi & \sin\chi \\ -\sin\chi & \cos\chi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \tag{3}$$

4) 机器人原点和消毒目标点分别表示决策层模块规划出路径的起点与终点。当映射点处于设备层模块的激

光雷达探测范围内时,映射点 $\boldsymbol{F}''$ 即为规划的终点,此时完成基于 ROS 的智能消毒机器人目标点的定位。

2.2 路径导航规划

基于 ROS 的智能消毒机器人路径自动导航软件系统,通过改进的 S 形轨迹规划方法保证规划的路径距离最短,并且当机器人遇到障碍物时,软件系统可以快速地规划出转弯路径,有效地规避障碍。

1) 直线路径规划

a) 智能消毒机器人从原点运动到消毒目标点的过程轨迹为一条直线时,引入笛卡尔坐标系,利用矢量方程表示出机器人原点 $\boldsymbol{F}$ 与终点 $\boldsymbol{G}$, 公式为

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}_1 \cdot m + \boldsymbol{Y}_1 \cdot n + \boldsymbol{Z}_1 \cdot f = \boldsymbol{F} \\ \boldsymbol{X}_2 \cdot m + \boldsymbol{Y}_2 \cdot n + \boldsymbol{Z}_2 \cdot f = \boldsymbol{G}\end{cases} \tag{4}$$

式中, $\boldsymbol{X}$、$\boldsymbol{Y}$、$\boldsymbol{Z}$ 分别表示消毒机器人原点与终点的坐标; m、n 分别表示矢量系数; f 表示的是笛卡尔系数。

b)利用基于 ROS 的智能消毒机器人原点与终点的直线距离,根据智能机器人的运行速度与总时间,计算出任意时刻下智能消毒机器人的位置矢量[8],公式为

$$\begin{cases}\boldsymbol{X} = \left(\dfrac{\boldsymbol{X}_2 - \boldsymbol{X}_1}{e}\right) \cdot \boldsymbol{v}_X t + \boldsymbol{X}_1 \\ \boldsymbol{Y} = \left(\dfrac{\boldsymbol{Y}_2 - \boldsymbol{Y}_1}{e}\right) \cdot \boldsymbol{v}_Y t + \boldsymbol{Y}_1 \\ \boldsymbol{Z} = \left(\dfrac{\boldsymbol{Y}_2 - \boldsymbol{Y}_1}{e}\right) \cdot \boldsymbol{v}_Z t + \boldsymbol{Z}_1\end{cases} \tag{5}$$

式中, e 表示起始点和终点之间的距离; $\boldsymbol{v}$ 为机器人运动的速度矢量; t 表示运行时间。

c) 在 ROS 的智能消毒机器人路径导航软件系统中,根据智能机器人的位置矢量以及获取的消毒目标点,绘制运动轨迹,然后采用笛卡尔坐标系的轨迹约束算法计算出机器人方向的变化过程[9-10]。

2) 转弯路径规划

a) 基于 ROS 的智能消毒机器人路径自动导航规划出的转弯路径,首先将智能消毒机器人的三维坐标系转换成二维坐标系[11],通过计算坐标系中转弯路径的弧度确定出路径的圆心角。转弯路径坐标系如图 3 所示。

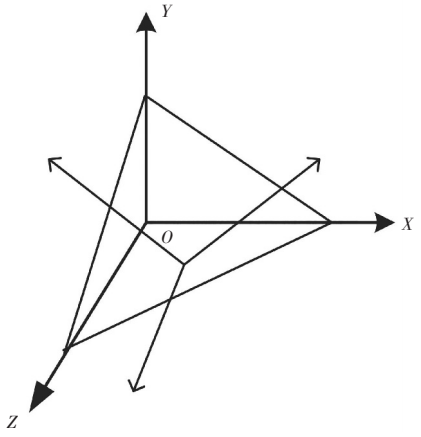


图 3 转弯路径坐标系

Fig. 3 Coordinate system of turning path

b)利用转换矩阵转换坐标系[12]。当基于 ROS 的智能机器人运动时会产生相对坐标系的基础条件,所以通过坐标轴旋转可得到转换矩阵,用如下公式表示。

$$\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix}\cos\sigma & -\cos\sigma\sin\sigma & \sin\sigma\cos\sigma & X \\ \sin\sigma & \cos\sigma\cos\lambda & -\sin\lambda\cos\sigma & Y \\ 0 & \sin\lambda & \cos\lambda & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{6}$$

式中, $\boldsymbol{Q}$ 为转换矩阵; σ 表示的是基础坐标系与 X 轴之间的角度; λ 表示的是基础坐标系与 Y 轴之间的角度。

c)在任意时间段内,基础坐标系与转弯路径坐标系都存在一定的对应关系,根据如下公式计算出 S 轨迹周期对应的圆心角 $\Delta\gamma$ 与总步长 P 。其中 M 为基础坐标轴移动的长度, R 为转弯路径的长度, γ_1 为 S 轨迹前半段圆弧总圆心角, γ_2 为 S 轨迹后半段圆弧总圆心角, v_s 为机器人行驶线速度。

$$\begin{cases}\boldsymbol{Q} = (X,Y,Z) \cdot M(X \cdot \sigma) \cdot M(Y \cdot \lambda) \\ \dfrac{v_s \cdot t}{R} = \Delta\gamma \\ P = \dfrac{\gamma_1 + \gamma_2}{1 + \Delta\gamma}\end{cases} \tag{7}$$

d) 根据公式(7)计算出的圆心角与总步长,计算出基于 ROS 的智能消毒机器人转弯路径中第 i 个轨迹点的位置坐标[13],公式为

$$\begin{cases}X_i = R\cos\gamma_i = R\cos\left[\dfrac{(\gamma_1 + \gamma_2)}{P}\right] \\ Y_i = R\sin\gamma_i = R\sin\left[\dfrac{(\gamma_1 + \gamma_2)}{P}\right] \\ Z_i = 0 \\ i = 0,1,\cdots,P\end{cases} \tag{8}$$

e) 基于 ROS 的智能消毒机器人路径自动导航软件程序,结合硬件平台中的主控制器,可以计算出智能消毒机器人末端执行器在所有轨迹点位置坐标中的位姿角度[14-15]。进而在 ROS 系统中完成智能消毒机器人的路径自动导航规划,公式为

$$\boldsymbol{K}_i = \boldsymbol{Q} \cdot P + \begin{bmatrix}X_i \\ Y_i \\ Z_i\end{bmatrix} \tag{9}$$

式中, $\boldsymbol{K}_i$ 表示的是转弯位置轨迹。

3 实验与分析

为了验证基于 ROS 的智能消毒机器人路径自动导航系统的整体有效性,需要对基于 ROS 的智能消毒机器人路径自动导航系统作出测试。硬件配置为 3.50 GHz CPU、5.00 GB 存储器,软件配置为 Mac OS 的 PC 机,运行环境为 NET Framework。实验设备采用长臂消毒机器人, Web 服务器软件。具体如图 4 所示。

笔记本计算机端发送目的地坐标给长臂消毒机器人,机器人接收后进行路径规划,遇路障时导航系统识别并绕

开,之后继续沿规划路径运动,到达目的地后退出导航程序并进行消毒。将导航效率、导航精度、避障能力和消毒目标定位效果作为评价指标,采用基于 ROS 的智能消毒机器人路径自动导航系统方法、基于 RANSAC 算法的植保机器人导航路径检测方法、动态环境下改进人工势场法的仓储机器人自主导航方法和基于模型预测控制的移动机器人户外导航方法完成对比测试。



图 4　机器人及实验场景

Fig. 4　Robot and experimental scene

1）导航效率

采用所提方法、文献[3]方法、文献[4]方法和文献[5]方法对 10 组智能消毒机器人的路径自动导航,对比不同方法所用的导航时间。不同方法的测试结果如表 1 所示。

表 1　不同方法的导航时间

Tab. 1　Navigation time of different methods

实验次数/组	导航时间/s			
	所提方法	文献[3]方法	文献[4]方法	文献[5]方法
1	30	51	70	65
2	36	55	75	70
3	37	57	70	69
4	32	56	74	68
5	34	59	79	65
6	35	52	71	64
7	37	57	76	63
8	39	51	70	67
9	34	58	79	68
10	32	57	72	69

分析表 1 中的数据可知,针对智能消毒机器人路径的自动导航,所提方法的导航时间在 35 s 附近波动,文献[3]算法、文献[4]算法和文献[5]算法的导航时间分别在 55 s、75 s、65 s 附近波动,通过对比发现,在不同实验序号下所提算法的导航时间均小于文献[3]算法、文献[4]算法和文献[5]算法的导航时间,表明所提算法的效率高于其他 3 种算法的效率。

2）导航精度

在智能消毒机器人路径的自动导航中,采用导航偏差作为评价各方法导航精度的指标。导航偏差数值计算公式为

$$\begin{cases} b_1 = | C - c | \\ b_2 = | H - h | \end{cases} \tag{10}$$

式中,b_1、b_2 分别代表横向偏差值与纵向偏差值;C 表示消毒目标横坐标;H 表示消毒目标点的纵坐标;c 表示横坐标;h 为机器人终点纵坐标。

偏差值柱状图如图 5 所示。

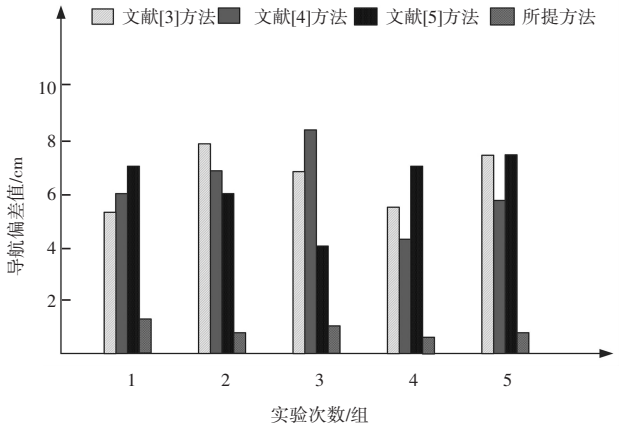


图 5　不同方法的导航偏差值

Fig. 5　Navigation deviation values of different methods

分析图 5 可知,针对智能消毒机器人路径的自动导航,所提方法的导航偏差值均小于文献[3]方法、文献[4]方法和文献[5]方法的导航偏差值。并且随着实验次数的增加,所提方法的导航偏差值比较稳定,而文献[3]方法、文献[4]方法和文献[5]方法的导航偏差值上下浮动较大。说明针对智能消毒机器人路径的自动导航,所提方法的导航精度较高且稳定。

3）避障能力

避障能力是指针对智能消毒机器人路径自动导航过程中,能否避开路径中存在的障碍物,是反映导航方法性能的重要指标。4 种方法的避障能力结果如图 6 所示。

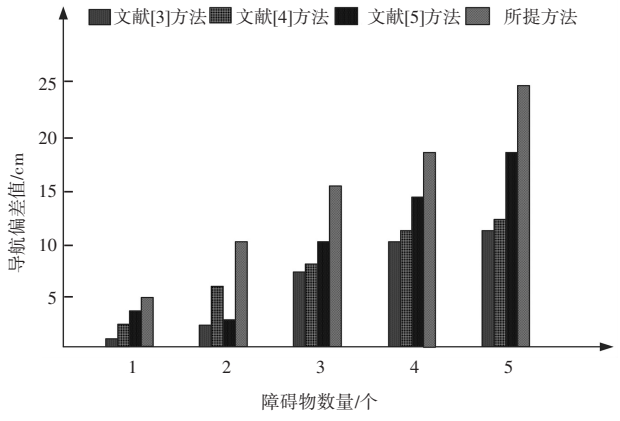


图 6　不同方法的避障情况

Fig. 6　Obstacle avoidance of different methods

对图 6 分析可知,针对智能消毒机器人路径中的所有障碍物,所提方法可以完全避开。而文献[3]方法、文献[4]方法和文献[5]方法遇到障碍物时,不能完全避开。说明所提方法的导航性能高于文献[3]方法、文献[4]方法和文献[5]方法的导航性能,所提方法对智能消毒机器人路径自动导航时,采用改进的 S 形轨迹规划算法可以准确地避开障碍物,所以其具有更优秀的导航性能。

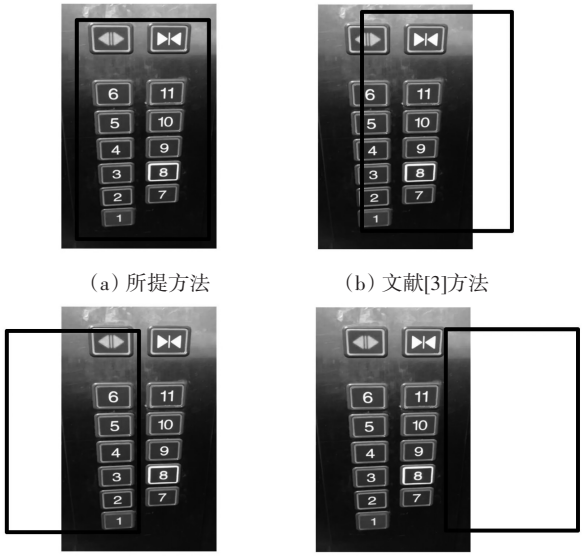
4) 消毒目标定位效果

对公共场景下电梯按钮进行消毒,利用所提方法、文献[3]方法和文献[4]方法对图 7 图像中的消毒目标定位,定位效果分别如图 8(a)、(b)、(c)和(d)所示。



图 7 消毒目标定位效果

Fig. 7 Original image of disinfection target positioning



(a) 所提方法 (b) 文献[3]方法

(c) 文献[4]方法 (d) 文献[5]方法

图 8 消毒目标定位效果

Fig. 8 Disinfection target positioning effects of different methods

分析图 7 和图 8 可知,针对智能消毒机器人消毒目标的定位,所提方法定位结果准确;文献[3]方法和文献[4]方法定位结果发生偏移;文献[5]方法定位结果完全错误。说明所提方法对消毒目标定位效果最好。

4 结论

经测试发现,目前智能消毒机器人路径自动导航方法存在导航效率低、导航精度差、避障能力弱和目标定位效果差等问题。为此提出基于 ROS 的智能消毒机器人路径自动导航方法。该方法首先设计出 4 个模块组成的硬件系统,其次设计出消毒目标定位、直线路径和转弯路径规划等软件程序。将其综合后实现智能消毒机器人路径的自动导航。降低导航时间的同时,提高了方法的导航精度、避障能力和目标定位效果。

参考文献

[1]方凯,姚佳琪,李家旺. 基于神经网络的欠驱动水下机器人三维同步跟踪和镇定控制[J]. 控制理论与应用,2021,38(6):731-738.
[2]杨孟骐,赵爽,白晓帆,等. 服务机器人激光测距组件的环境可靠性模型及其定量评价方法研究[J]. 仪器仪表学报,2021,42 (1):108-115.
[3]李秀智,彭小彬,方会敏,等. 基于 RANSAC 算法的植保机器人导航路径检测[J]. 农业机械学报,2020,51(9):40-46.
[4]罗强,王海宝,崔小劲,等. 动态环境下改进人工势场法的仓储机器人自主导航系统研究[J]. 计算机应用研究,2020,37(3):745-749,762.
[5]郭明阳,刘爽. 基于模型预测控制的移动机器人户外导航方法[J]. 华东理工大学学报(自然科学版),2022,48(2):273-280.
[6]杜丽美,连玮. 高斯投影下的人机交互式物体仿真算法研究[J]. 计算机工程与应用,2020,56(11):185-191.
[7]鄢阳,杨永辉,宋友,等. 虚实映射视触觉感知在虚拟电气设备测试仪校准中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版),2021,54(12):1159-1165.
[8]杨二斌,王永刚,杨翠萍. 基于模糊逻辑的铁路货车标识喷涂机器人视觉导航研究[J]. 自动化技术与应用,2024,43(4):38-42.
[9]赵丹. 基于机器学习的轮式机器人关节爬坡运动轨迹控制方法[J]. 自动化技术与应用,2025,44(1):36-40.
[10]明阳,刘爽. 基于模型预测控制的移动机器人户外导航方法[J]. 华东理工大学学报(自然科学版),2022,48(2):273-280.
[11]郭娜,王田苗,胡磊,等. ACL 重建手术增强现实导航系统的人机交互技术[J]. 计算机工程与应用,2020,56(21):224-230.
[12]陈红梅,常林江,徐振方,等. 复杂环境下 GNSS/INS/UWB 紧组合的无人机协同导航算法[J]. 仪器仪表学报,2021,42(7):98-107.
[13]鞠庆,刘飞飞,李光昌,等. 室内环境自主消毒防疫机器人系统设计[J]. 传感器与微系统,2023,42(12):103-106.
[14]张开. 复杂场景下工业机器人自适应轨迹规划与避障算法开发研究[J]. 丝路纵横,2025(10):74-75.
[15]刘欣达,王家俊,周涛. 复杂病房环境下改进 ORB-SLAM3 的机器人定位导航研究[J]. 传感器与微系统,2026,45(1):62-66.