# Navigation and Positioning Method for Indoor Mobile Robots Based on Sensor Data Feedback*

XUAN Chunqing[1*], XUAN Zhiwei[2]
(1.College of Information and Electrical Engineering, Zhengzhou Business University, Gongyi He'nan 451200, China;
2.Information Engineering College, Henan Vocational University of Science and Technology, Zhoukou He'nan 466000, China)

**Abstract**: In order to improve the navigation and positioning accuracy of robots in complex environments, a navigation and positioning method for indoor mobile robots based on sensor data feedback is propose. Laser ranging sensors are used to perceive three-dimensional environmental information and obtain sensor data. To address data errors caused by active interference, mixed pixel interference, etc., Kalman filtering algorithm is used for filtering processing. The motion characteristics of robot navigation within the global coordinate system are analyzed. Robot environment perception sensor data are used as input for neural network improved fuzzy controller, robot motion feature parameters are input, and various control parameters are repeatedly adjusted based on the objective function, thereby achieving indoor robot navigation and positioning under sensor data feedback. Experimental results show that the robot navigation displacement obtained by the proposed method fits well with the actual displacement. Further explanation shows that the proposed method can enhance the robot's environmental perception ability and has high navigation and positioning accuracy.

**Key words**: indoor mobile robots; navigation positioning; sensor data feedback; Kalman filtering; improved fuzzy controller
**EEACC**: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2025.11.018

# 基于传感器数据反馈的室内移动机器人导航定位方法*

轩春青[1*], 轩志伟[2]
(1.郑州商学院信息与机电工程学院, 河南 巩义 451200; 2.河南科技职业大学信息工程学院, 河南 周口 466000)

**摘 要**: 为了提高机器人在复杂环境下的导航定位精度。提出基于传感器数据反馈的室内移动机器人导航定位方法。利用激光测距传感器感知三维环境信息, 获取传感器数据; 针对有源干扰、混合像素干扰等引起的数据误差, 采用卡尔曼滤波算法进行滤波处理; 在全局坐标系内分析机器人导航的运动特征。将机器人环境感知传感器数据作为神经网络改进模糊控制器的输入值, 并输入机器人运动特征参数, 根据目标函数反复调整各项控制参数, 进而实现传感器数据反馈下的室内机器人导航定位。实验证明, 所提方法得到的机器人导航位移与实际位移拟合度较高; 进一步说明所提方法能够提升机器人的环境感知能力, 并具有较高的导航定位精度。

**关键词**: 室内移动机器人; 导航定位; 传感器数据反馈; 卡尔曼滤波; 改进模糊控制器
**中图分类号**: TP242 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2025)11-2062-06

在复杂室内环境中, 机器人的导航和定位技术对于实现自主、智能的移动至关重要。然而, 由于室内环境的多样性和动态变化, 机器人的导航和定位仍然是一个具有挑战性的问题。由于导航机器人的耦合和时变性很大, 很容易受外部环境的影响, 导致参数误差、测量噪声等问题, 从而影响导航精度, 给机器人的轨道规划带来了不确定性[1]。轨迹跟踪作为解决这一问题的有效途径, 它能够充分地考虑到机器人的实际位置和移动状况, 从而实现精确的自动导航。

由于机器人系统的非线性特征, 导致轨迹跟踪控制效果较差, 为此, 相关领域学者对室内移动机器人导航定位方法展开了大量研究: 毛文勇等[2]提出多传感器融合的轨迹跟踪算法。利用卡尔曼滤波算法融合多传感器数据, 获取精准的机器人坐标, 构建跟踪误差模型, 设置模糊控制器, 确保跟踪过程稳定。但该方法未能对多传感器融合数据进行精准的反馈, 在面对光照变化、遮挡等问题时, 往往会出现定位精度下降、甚至失效的情况。侯加林等[3]结合激光雷达和编码器的信息, 利用 Cartographer 算法获取实时位置, 利用 Dijkstra 算法对机器人全局路线进行规划, 并利用动态窗算法进行局部路径规划,

**项目来源**: 河南省科技厅科技攻关项目(232102220010); 河南省高等学校重点科研项目(23B520017)
**收稿日期**: 2023-12-12 **修改日期**: 2024-01-23

实现了自动导航。该方法对环境的感知更加精确和可靠,但在处理动态环境变化和复杂场景时,也存在一定的挑战。Ma 等[4]提出基于 U-model 的机器人轨迹跟踪控制新方法。引入 U-model 方法减轻了对动态数学模型的要求,简化了机械臂轨迹跟踪控制器的设计。采用改进的迭代学习控制算法,以更少的计算时间抑制初始状态误差的影响。但该方法未利用传感器精准采集动态物体的定位数据,无法有效处理动态环境中的干扰因素。

在复杂的环境中,特别是有大量的障碍物时,会使机器人对周围环境的感知力下降,使其不能精确地追踪到设定的运行路线。为此,研究基于传感器数据反馈的室内移动机器人导航定位方法。

## 1　基于传感器数据的机器人环境感知

### 1.1　基于传感器的机器人环境感知

机器人需通过传感器感知外界信息,实时采集环境信息对机器人轨迹跟踪尤为重要,能够起到如下作用:探测物体基本形状和位置信息,减少碰撞发生[5];结合环境信息,及时修改里程等[6]。激光测距传感器是机器人环境感知中常用的传感器之一。它通过向目标发射激光束,并接收从目标反射回来的信号,从而获取目标的距离、方位、高度、速度等信息。这些信息可以帮助机器人实现精确的定位和导航[7]。

将激光测距传感器用在环境感知中,传感器通过物理介质传输信号,测试过程可通过下述公式描述:

$$s=v\times\frac{t'}{2} \tag{1}$$

式中:$s$ 表示与被测物体距离,$v$ 表示信号传输速度,$t'$表示信号发送和接收的时间差。

一个激光测距传感器连续旋转,获得多个角度的距离信息,若多个传感器同时工作,在立体维度上激光光束呈现均匀分布,能够采集多角度信息,实现环境感知[8]。

### 1.2　传感器数据误差校正

激光测距传感器采集到的环境信息通常包含一定噪声,主要包括如下几种干扰因素。

①有源干扰

当人造光或自然光的频率成分和激光测距传感器相似时即为有源干扰[9]。若在较小区域内存在多台传感器同时工作,每个传感器发送的激光束可能会与其他传感器的激光束相互干扰,造成传感器之间的有源干扰。

②混合像素干扰

假设一个激光测距传感器被用于测量一个墙壁与地面的交界处的距离。当发射的光束照射到墙壁与地面交界的边缘时,墙壁表面的反射光和地面背景反射光将在接收器中同时被接收到。这种情况下,反射光和背景反射光的光程在一个时间段上发生重叠,形成了混合像素干扰[10]。混合像素干扰会使得接收器无法准确识别反射点的位置。在测量墙壁与地面交界的距离时,由于混合像素干扰,可能会产生虚假的反射点,使得测量结果不准确。此外,由于混合像素干扰,接收到的反射光信号中包含了与背景反射光重叠的部分。这样会使得测量值中的有效反射光信号与背景反射光信号相混叠,导致测量误差增加。

③障碍物干扰

障碍物遮挡会形成扫描盲区,由于激光测距传感器扫描点属于离散状态,当机器人运动时,传感器按照固定频率扫描环境,因此会存在扫描间隙。这会使得目标物体的距离无法得到有效的测量。这会导致机器人在遇到障碍物时,无法准确估计与障碍物之间的距离,可能会产生安全问题或导致碰撞发生。此外,在障碍物干扰下,盲点区域内的目标物体将无法被激光传感器所探测到,导致相关信息的丢失。这可能导致机器人在导航时无法触发避障行为或正确判断目标物体的距离和位置。

然而,在特定区域或对特定目标进行密集采样和重叠扫描,以获取更多的数据点并减少盲点的影响。这可以提高测量的精度和可靠性,在一定程度上弥补盲点带来的局限性。

为减少噪声导致的传感数据误差,利用卡尔曼滤波算法对有源干扰和混合像素干扰产生的噪声进行去噪。卡尔曼滤波是概率模型和参数估计的结合,卡尔曼滤波结合环境模型和动态状态估计,将数据误差作为依据进行校正,不断接近实际值。针对机器人这种非线性系统,需要对机器人的状态方程进行线性操作,使用卡尔曼滤波器来完成数据误差估计。从而估计出更准确的环境信息。

激光测距传感数据的随机线性方程表示为[11]:

$$\boldsymbol{X}_k=s\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}\boldsymbol{T}_{k,k-1}W_{k-1} \tag{2}$$

$$Z_k=(\boldsymbol{H}_k\boldsymbol{X}_k)^{\mathrm{T}}+V_k \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{X}_k$ 表示激光测距传感数据状态矢量,$Z_k$ 表示激光测距传感数据观测序列,$W_{k-1}$表示系统噪声序列,$V_k$ 表示激光测距传感数据观测噪声序列,$\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}$与 $\boldsymbol{T}_{k,k-1}$分别表示激光测距传感数据的状态转移和观测输入矩阵,$\boldsymbol{H}_k$ 表示激光测距传感数据的观测

矩阵。

在 $k$ 时刻时,激光测距传感数据状态的估计值可通过下述公式计算:

$$\hat{X}_{k,k-1}=\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}^{\mathrm{T}}\hat{X}_{k-1} \tag{4}$$

$$\hat{X}_k=\hat{X}_{k,k-1}+K(Z_k-\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}}) \tag{5}$$

误差估计方程如下:

$$P_k=[\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}}-Z_k]\boldsymbol{P}_{k,k-1}^{\mathrm{T}}+\hat{X}_k\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

式中:$\boldsymbol{P}_{k,k-1}$ 表示数据误差估计的观测矩阵,利用式(6)估计出测量误差,根据该误差完成校正,确保激光测距传感器测量的数据更加真实,为轨迹跟踪提供参考依据。

### 1.3 机器人导航运动特征分析

机器人导航系统的工作流程如图 1 所示。利用光电编码器处理激光测距传感器中校正后的数据,进而获取准确的测距结果。在此基础上根据信息特征进行跟踪,达到导航定位的目的。

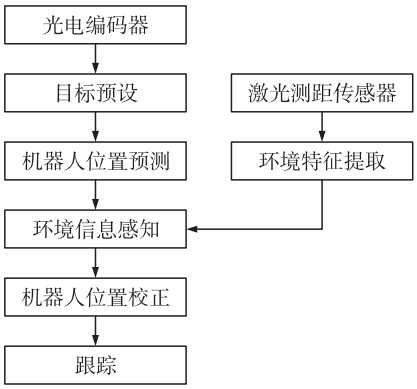



**图 1 机器人导航工作流程图**

为获得良好的跟踪效果,需分析机器人的动力学特征。将两轮式机器人作为研究目标,假设在全局坐标系中,两个轮子之间的距离表示为 $2l$,每个轮子围绕水平轴转动的角度分别描述为 $r_1$ 和 $r_2$,驱动轮半径是 $R$,则机器人运动线速度与角速度表示为:

$$v(t)=\frac{(r_1+r_2)\,dR}{2l} \tag{7}$$

$$w(t)=\frac{(r_2-r_1)\,dR}{2l} \tag{8}$$

式中:$d$ 表示机器人质心到坐标原点的距离,$v(t)$ 和 $w(t)$ 分别表示线速度与角速度。这两个速度指标将直接作为控制器输入的一部分。

## 2 基于传感器数据反馈的机器人导航定位

基于传感器数据感知机器人环境,通过滤波处理实现传感器数据去噪,分析机器人导航运动特征,得到机器人运动线速度与角速度,进而得到精准的机器人所处环境信息。为了保证机器人能精确地追踪预定的运动轨迹,需要通过控制器将模糊理论和神经网络相结合[12]。传统的神经网络由于无法准确获取室内移动机器人周围环境。不能准确地获取机器人运动特征数据,存在着很大的不确定性,而且很难保证数据实时性。为了解决这个问题,引入了一种基于传感器数据反馈的导航定位方法。通过激光测距传感器获取室内移动机器人周围环境的传感数据,并利用这些数据进行机器人的导航和定位。这种数据反馈机制使得机器人能够实时获取周围环境信息,从而更好地适应环境变化。然后通过神经网络算法对获取的传感数据进行处理和分析,对环境进行识别和分类,区分出不同的障碍物,实现机器人导航和避障定位。设计基于神经网络的模糊控制器,对反馈的传感器数据进行持续的训练,以增强控制器对激光测距传感器反馈数据的自学习性能,并对其进行了实时的补偿。通过引入传感器数据反馈机制、结合机器学习算法以及引入模糊控制理论,提高室内移动机器人对周围环境的感知能力,实现更准确、更实时的导航和定位。

假设模糊神经网络的输入和输出分别表示为 $e$ 和 $e'$,表达式如下:

$$e=[e_1,e_2]=(v(t)w(t)-P_k)[q_1-q_2\quad l_1-l_2] \tag{9}$$

$$e'=[e_1',e_2']=[v(t)w(t)-P_k][q_2-q_1\quad l_2-l_1] \tag{10}$$

式中:$q_1$、$q_2$ 和 $l_1$、$l_2$ 表示两个关节位移及对应的速度。

则模糊控制器的输入可以描述为:

$$\boldsymbol{U}=[e_1\quad e_1'\quad e_2\quad e_2'] \tag{11}$$

将模糊控制器划分为三层,首层为模糊化层,其所有节点均对应一种语言变量,并运算输入隶属函数,完成模糊变量的模糊化操作。如果 $y_{1,i}$ 表示第一层神经元 $i$ 的输出值,则隶属度函数如下:

$$y_{1,i}=U\frac{c_i}{\delta^2}\quad i=1,2,\cdots,20 \tag{12}$$

式中:$c_i$ 表示调整参数,$\delta$ 表示训练误差。

第二层完成取大计算,$y_{2,i}$ 表示的二层神经元 $i$ 的输出,则有:

$$y_{2,i}=\max(w_i\times y_{1,i})\quad i=1,2,\cdots,20 \tag{13}$$

式中:$\delta$ 表示连接权值,$\max(\cdot)$ 表示最大算子。

第三层实现取小计算,即计算第二层中全部神经元的输出最小值:

$$y_{3,i}=\min(y_{2,i}) \tag{14}$$

式中:$\min(\cdot)$ 表示最小算子。

为提高误差跟踪精度,需要对调整参数 $c_i$ 和误差参数 $\delta_i$ 进行反复训练,目标函数如下:

$$D=y_{3,i}\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{2}(A_i)^2 \tag{15}$$

式中：$A_i$ 表示控制器输出力矩，进而确定跟踪控制器的各项参数：

$$c_i=-a_i\frac{D}{c_i} \tag{16}$$

$$\delta_i=-a_i\frac{D}{\delta_i} \tag{17}$$

式中：$a_i$ 表示学习速率。

确定相关参数后，将传感器数据作为控制器输入参数，即可通过该控制器控制机器人的跟踪轨迹，使机器人能够导航定位预先设定的轨迹。

综上可知，机器人导航定位方法整体流程如图 2 所示。

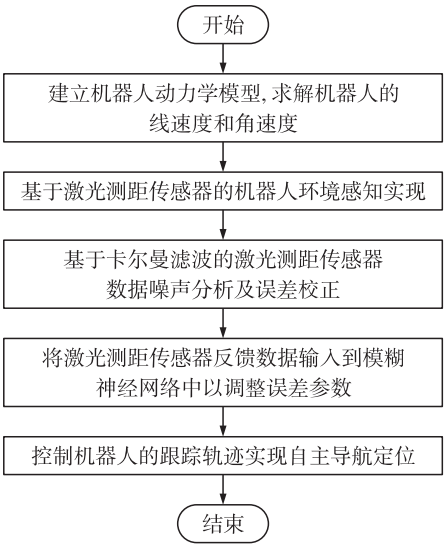



**图 2　机器人导航定位方法流程图**

## 3　实验分析

为测试基于传感器数据反馈的室内移动机器人导航定位方法的可行性，在 Gazebo 测试平台中，使用 Solidworks 工具构建机器人模型。测试平台硬件结构如图 3 所示。

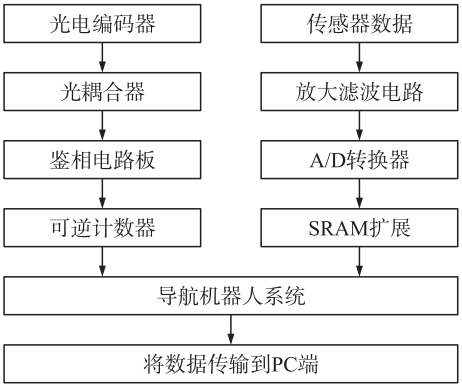



**图 3　测试平台硬件结构示意图**

实验系统原理如图 4 所示。

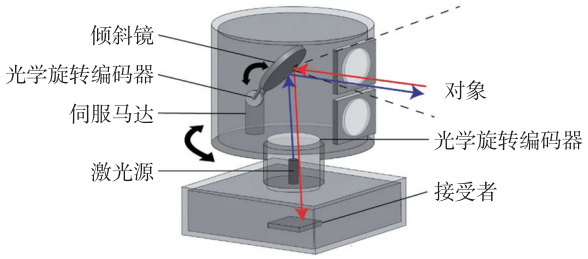



**图 4　导航定位系统原理图**

在测试平台中，针对激光器的选型应注意以下几点：最小和最大测量距离、是否具备准确检测障碍物的能力、保证测试过程中噪声最小、操作的速度与机器人运动速度应相互匹配、功耗低、体积小等。综合上述要求，本次实验激光测距传感器选用的型号为 LMS221－S26，工作原理是测量脉冲时间射程。激光测距传感器和室内移动机器人的具体性能参数如表 1 所示。

**表 1　实验设备性能参数表**

| 激光测距传感器 | |
|---|---|
| 测量范围 | ≤90 m |
| 最大测量角度 | 180° |
| 测量分辨率 | 15 mm |
| 测量误差 | ±15 mm |
| 传输速率 | 500 K |
| 反应时间 | 15 ms |
| **室内移动机器人** | |
| 外形尺寸 | 685 mm×408 mm×143 mm |
| 驱动轮半径 | 80 mm |
| 机器人总质量 | 23.5 kg |
| 导轮半径 | 80 mm |
| 两侧轴间距 | 455 mm |

基于 LMS221-S26 型激光测距传感器和室内移动机器人搭建室内移动机器人导航定位实际测试环境，在真实环境下进行定位与导航的测试，实验环境现场如图 5 所示。


**图 5　室内移动机器人导航定位实际测试环境**

如图 5 所示,设置室内环境,在场景内摆放桌子(长方形)和椅子(三角形)及工作人员(圆形)三类障碍物。通过桌子(长方形)和椅子(三角形)的摆放模拟真实的复杂环境。将工作人员作为动态障碍物模拟动态环境。

在该实验环境的基础上,分别利用所提出的基于传感器数据反馈的室内移动机器人导航定位方法、文献[3]提出的双激光雷达方法、文献[4]提出的 U-model 方法进行环境感知,分析机器人能否准确避开障碍物。测试结果分别如图 6~图 8 所示。

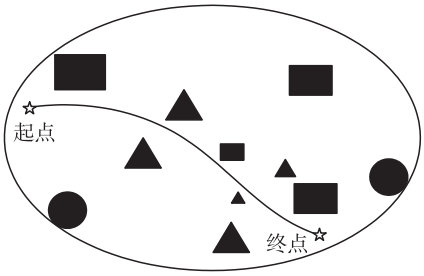



**图 6 传感器数据反馈方法的环境感知结果示意图**

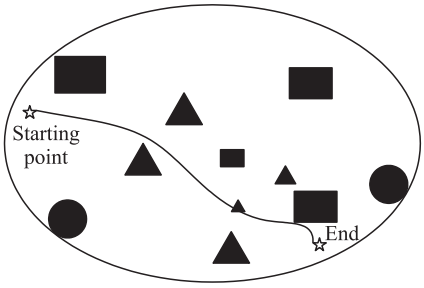



**图 7 双激光雷达方法的环境感知结果示意图**

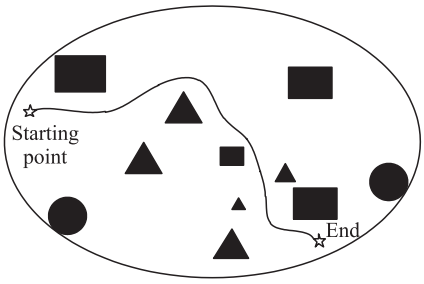



**图 8 U-model 方法的环境感知示意图**

由图 6~图 8 能够直观看出,通过传感器数据反馈方法,可以精确地感知到周围的环境,使得机器人能够顺利地避开障碍物,并规划出最短的路径;双激光雷达方法尽管路径较短,却会与障碍物产生碰撞;U-model 方法具有良好的避障性能,但是机器人的运动轨迹比较长。所提方法利用激光测距传感器获得更多的环境信息,同时卡尔曼滤波技术可以消除传感器感知过程中的噪声干扰,增强传感器数据信息的可靠性,因而对环境的敏感度最好。

为进一步验证传感器数据反馈方法的导航定位性能,分别在预先设定好的圆弧轨迹下进行机器人导航定位,定位结果如图 9 所示。

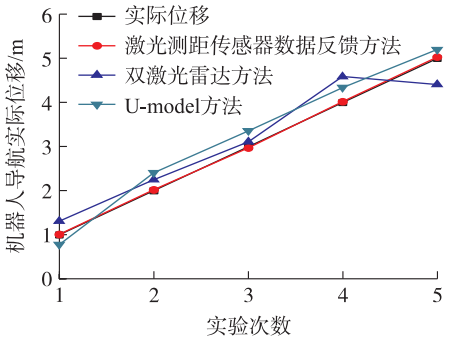



**图 9 室内移动机器人导航定位精度**

由图 9 可以得出,所提传感器数据反馈方法得到的机器人导航位移与实际位移拟合度较高;双激光雷达方法得到的机器人导航位移与实际位移平均相差 0.370 m;U-model 方法得到的机器人导航位移与实际位移平均相差 0.306 m。这是因为所提方法采用激光测距传感器及卡尔曼滤波算法获取高精度的环境感知数据,通过神经网络改进模糊控制器,输入激光测距传感器的反馈数据,根据目标函数反复调整各项控制参数,确保控制误差最小,实现机器人高精度导航定位。

## 4 结论

本研究提出一种基于传感器数据反馈的室内移动机器人导航定位方法,通过激光测距传感器感知机器人所处环境,通过卡尔曼滤波处理消除数据噪声,在实现轨迹跟踪的同时能够灵活避障。此外,采用模糊神经网络算法设置控制器,以激光测距传感器数据作为反馈控制的输入,解决了定位的非线性和不确定性,确保机器人能够精准跟踪预先设定的轨迹。实验结果表明,该方法能够提升机器人的环境感知能力,在圆弧轨迹下,该方法的导航定位跟踪误差平均值为 0.022 m,有效提升了室内移动机器人的导航定位精度。

**参考文献:**

[1] 丁力,吴洪涛,李兴成,等. 移动机器人的最优轨迹跟踪控制研究[J]. 机械设计与制造,2020(2):271-274.

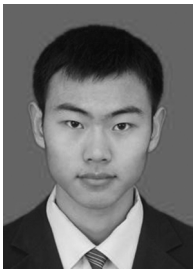
[2] 毛文勇,张文安,仇翔.基于多传感器融合的机器人轨迹跟踪控制[J]. 控制工程,2020,27(7):1125-1130.

[3] 侯加林,蒲文洋,李天华,等. 双激光雷达温室运输机器人导航系统研制[J]. 农业工程学报,2020,36(14):80-88.

[4] Ma X H, Zhao Y, Di Y Q. Trajectory Tracking Control of Robot Manipulators Based on U-Model[J]. Mathematical

Problems in Engineering,2020,2020(1):8314202.
[5] Morlock M, Bajrami V, Seifried R. Trajectory Tracking With Collision Avoidance for a Parallel Robot With Flexible Links[J]. Control Engineering Practice, 2021, 111(3):104788.
[6] 李敏,冯亚丽,吴东林.采摘机器人动态果实目标检测与跟踪技术研究——基于云存储[J]. 农机化研究, 2020,42(9):207-211.
[7] Peng H,Li F,Liu J,et al. A Symplectic Instantaneous Optimal Control for Robot Trajectory Tracking With Differential-Algebraic Equation Models[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2020,67(5):3819-3829.
[8] 孙正凤,张朋,刘小军.基于惯性测量单元的轮式机器人轨迹跟踪仿真[J]. 计算机仿真,2021,38(2):331-334,481.
[9] Madridano A, Al-Kaff A, Martín D, et al. 3D Trajectory Planning Method for UAVs Swarm in Building Emergencies [J]. Sensors,2020,20(3):642.
[10] 黄磊,余峰.基于视觉反馈的机器人末端轨迹跟踪控制研究[J]. 仪表技术与传感器,2021(8):95-98.
[11] Zheng Y L,Chen S N,Cheng H. Real-time Cloud Visual Simultaneous Localization and Mapping for Indoor Service Robots[J]. IEEE Access,2020,8:16816-16829.
[12] Tsai S H,Kao L H,Lin H Y,et al. A Sensor Fusion Based Nonholonomic Wheeled Mobile Robot for Tracking Control [J]. Sensors,2020,20(24):7055.

**轩春青**(1982—),女,汉族,河南周口人,硕士,郑州商学院信息与机电工程学院教授,研究方向为数据采集与分析、嵌入式系统等。主持河南省科技厅科技攻关项目 3 项,河南省高等学校重点科研项目 1 项,参与省部级项目 5 项,在国内刊物发表学术论文 23 篇,xuanchunqing5656@ yeah.net;



**轩志伟**(1989—),男,河南周口人,硕士,河南科技职业大学信息工程学院讲师,主要从事动态测试与嵌入式系统等方面的研究,在国内刊物发表论文 14 篇,shine071201@ 163.com。