



文章编号:1671-251X(2020)09-0051-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020030023

井下移动机器人智能视觉避障研究

彭继国^{1,2}, 张波^{1,2}, 孙凌飞¹, 邓攀¹

(1. 兖矿集团有限公司 信息化中心, 山东 邹城 273500;
2. 北斗天地股份有限公司 山东分公司, 山东 邹城 273500)



扫码移动阅读

摘要:针对现有井下移动机器人避障方法在面对井下复杂障碍物时不能准确检测障碍物位置信息,对井下非线性障碍物不能准确进行避障控制等问题,提出了一种基于模糊控制的井下移动机器人智能视觉避障方法。首先采用双目立体视觉模组作为障碍物检测传感器,感知井下环境信息,实时检测障碍物分布情况,并构建占据栅格地图。然后通过八叉树结构模型构建三维点云,使用树状结构对点云数据进行结构化描述,并将其映射到占据栅格地图中,得到障碍物的区域分布情况。最后采用模糊控制策略对实时检测到的障碍物在占据栅格地图中的分布情况进行处理,将当前时刻障碍物在占据栅格地图中的分布情况和移动机器人运行速度作为模糊控制器的输入变量,通过模糊控制算法计算下一时刻移动机器人的转向角度和加速度,从而实现井下移动机器人的智能避障控制。根据移动机器人实际占据空间,设计外接包围盒进一步稳定控制算法,结合避障策略进行智能避障,避免移动机器人与障碍物发生碰撞。实验结果表明,该方法能够准确对井下障碍物分布情况进行描述,使移动机器人能够根据所设计的模糊控制规则准确自主地进行避障操作,从而实现自适应运动。

关键词:井下移动机器人;双目立体视觉;模糊控制;三维点云;占据栅格地图;智能避障

中图分类号:TD67 文献标志码:A

Research on intelligent visual obstacle avoidance of underground mobile robot

PENG Jiguo^{1,2}, ZHANG Bo^{1,2}, SUN Lingfei¹, DENG Pan¹

(1. Information Center, Yankuang Group Co., Ltd., Zoucheng 273500, China;

2. Shandong Branch, Beidou Tiandi Co., Ltd., Zoucheng 273500, China)

Abstract: In view of problems that existing obstacle avoidance methods of underground mobile robot cannot accurately detect obstacle position information when facing complex obstacles and is inability to perform accurate obstacle avoidance control for the underground nonlinear obstacles, an intelligent visual obstacle avoidance method of underground mobile robot based on fuzzy control was proposed. First, binocular stereo vision module is used as obstacle detection sensor to perceive underground environment information, detect distribution of obstacles in real time, and construct occupation grid map. Then, the octree structure model is used to construct three-dimensional point cloud, and the tree structure is used to describe point cloud data structurally, which is mapped to the occupation grid map to obtain regional distribution of obstacles. Finally, a fuzzy control strategy is used to process distribution of obstacles detected in real time in the occupation grid map, and distribution of obstacles in the occupation grid map at the current moment and the running speed of the mobile robot are used as input variables of the fuzzy

收稿日期:2020-03-09;修回日期:2020-08-28;责任编辑:张强。

作者简介:彭继国(1979—),男,山东菏泽人,高级工程师,现主要从事矿山工业智能装备研发与应用、信息与系统科学与工程与技术方面的工作,E-mail:pengjiguo@ykjt.cn。

引用格式:彭继国,张波,孙凌飞,等.井下移动机器人智能视觉避障研究[J].工矿自动化,2020,46(9):51-56.

PENG Jiguo,ZHANG Bo,SUN Lingfei,et al. Research on intelligent visual obstacle avoidance of underground mobile robot[J]. Industry and Mine Automation,2020,46(9):51-56.

controller. The fuzzy control algorithm is used to calculate steering angle and acceleration of the mobile robot at the next moment, so as to realize intelligent obstacle avoidance control of the underground mobile robot. According to actual space occupied by the mobile robot, an external bounding box is designed to further stabilize control algorithm, and the obstacle avoidance strategy is combined to perform intelligent obstacle avoidance to avoid collision between mobile robot and obstacle. The experimental results show that the method can accurately describe distribution of underground obstacles, and enable the mobile robot to avoid obstacles accurately and autonomously according to the designed fuzzy control rules, so as to realize adaptive movement.

Key words: underground mobile robot; binocular stereo vision; fuzzy control; three-dimensional point clouds; occupation grid map; intelligent obstacle avoidance

0 引言

我国矿产资源丰富,但是矿井地质结构复杂^[1]。在井下恶劣环境下,利用机器人代替人员进行智能环境安全检测预警、智能开采检测、矿难救灾及智能巡检等,可最大程度实现煤矿井下无人化作业,大幅提升煤炭生产的安全性^[2-3]。煤矿井下环境大多是非结构的,具有复杂性、多样性和随机性等特征,井下移动机器人只有具备较高的环境辨识、路径规划和避障能力,才能准确完成预期任务^[4-5]。当井下移动机器人面对完全未知或者部分未知的环境时,避障、越障是其要完成的首要工作。

目前大多井下移动机器人不具备自主控制及智能避障功能,遇到较为复杂的井下环境时需依靠操作人员的经验进行判断,智能性和移动性较差^[6-8],因此,研究具有智能避障功能的井下移动机器人具有重要意义。众多学者对井下移动机器人的避障功能进行了研究。贾瑞清等^[9]以矿井移动机器人为实验平台,根据超声测距原理,利用超声波传感器探测障碍物信息,并对所测得的障碍物信息进行处理,最终实现移动机器人的实时自主避障。许心德等^[10]提出了利用路径跟踪和 VFH* 相结合的方法来解决机器人沿预定路径前进中的避障问题。但超声波传感器在障碍物检测方面存在一定的误差,而且检测范围较小。刘欢等^[11]提出了基于 Q 学习避障算法的移动机器人避障方法,模拟移动机器人在未知环境下自主、安全地从起始点到达目标点的过程,但是 Q 学习算法用于非线性的障碍物时不能准确进行避障控制。周恺^[12]提出了一种基于信息素模糊逻辑导引的机器人室内避障算法,把机器人的运动轨迹描述为一个种群觅食问题,以种群觅食中释放的信息素作为避障导引,求出机器人运动参数和环境参数,构建机器人行为运动方程,根据环境播撒信息素,以此驱动机器人运动,实现避障算法改进,但在障碍区分布不规则的情况下,该方法避障性能不

好。徐斌等^[13]提出了一种基于背景帧差法获取环境障碍物位置信息的方法,利用获取的障碍物信息对运动空间进行离散建模,控制机器人进行避障操作,但利用单相机帧差法存在障碍物检测不准确的问题。肖雪等^[14]提出了一种基于光流的自主移动机器人避障系统,将机器人在运动过程中通过摄像头拍摄的连续图像序列作为输入,使用金字塔 Lucas-Kanade 方法在角点处提取光流信息,求解延伸焦点和接近时间,并通过改进的平衡策略估计障碍物可能存在的位置,但光流法对光环境要求比较严苛,同样存在障碍物检测不准确等问题。

针对上述方法存在的问题,本文提出了一种基于模糊控制的井下移动机器人智能视觉避障方法。构建双目立体视觉模组对井下环境进行感知,利用占据栅格地图对空间三维环境进行结构化描述,根据当前区域障碍物相对移动机器人的距离以及角度,通过模糊控制算法计算移动机器人下一时刻的转向角度和加速度,从而实现移动机器人的智能避障控制。使用 Matlab 对所提出的方法进行仿真实验,结果表明:该方法能够根据所设计的模糊控制规则准确自主地进行避障操作,并且对井下障碍物分布具有先验性,可对不同距离的障碍物分布情况进行预警,从而实现井下移动机器人的自适应运动。

1 机器视觉基础理论

视觉传感器是组成移动机器人的重要模块,用于模拟人类的视觉感知功能,利用计算机及图像采集设备对三维空间进行非接触式测量,利用图形处理算法对客观三维世界进行感知和理解^[15],提高移动机器人的自主避障、导航及自适应能力,实现智能避障。理想结构下的双目立体视觉模型如图 1 所示,其中 2 个相机的光轴及对应成像平面的坐标轴是平行的,且成像平面处于同一平面。

在双目立体视觉模型中,将左相机光心作为空间坐标原点,左右相机像面以左上角为原点建立图

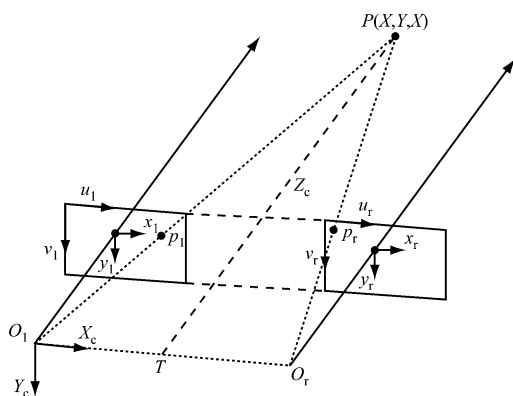


图1 双目立体视觉模型

Fig. 1 Binocular stereo vision model

像素坐标系(其中变量下标 l 表示左侧相机, r 表示右侧相机), 分别为 $u_l - v_l, u_r - v_r$ 。物理坐标系以左右像面的中心点为原点: $x_l - y_l, x_r - y_r$; 2 个相机光心点为 O_l, O_r ; $p_l(u_{l0}, v_{l0}), p_r(u_{r0}, v_{r0})$ 为光轴与像平面的交点。 T 为左右相机光心的距离, 称为基线距。在建立的双目立体视觉模型中, 空间中任意一点 $P(X, Y, Z)$ 的坐标计算公式如下:

$$\begin{cases} Z = \frac{fT}{(x_l - x_r)} \\ X = \frac{Z}{f}x_l \\ Y = \frac{Z}{f}y_l \end{cases} \quad (1)$$

式中 f 为相机焦距。

进一步将物理坐标转换到像素坐标:

$$\begin{cases} x = (u - u_0)d_x \\ y = (v - v_0)d_y \end{cases} \quad (2)$$

式中: u, v 为图像像素坐标点; u_0, v_0 为图像坐标原点; d_x, d_y 为 x, y 方向的像元大小。

分别将左右两侧相机的像素坐标代入式(1), 计算可得

$$\begin{cases} Z = \frac{fT}{(u_l - u_r)d_x} = \frac{f_x T}{d} \\ X = \frac{T}{d}(u_l - u_{l0}) \\ Y = \frac{f_x T}{f_y d}(v_l - v_{l0}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_x, f_y 为相机在 x 方向和 y 方向上的焦距; d 为视差, $d = u_l - u_r$ 。

本文利用张正友标定法^[16]进行立体标定, 得到相机的内外参数矩阵, 主要有左右相机镜头的畸变参数和三维空间中 2 个相机之间的空间关系。使用区域匹配方法^[17]对立体校正后的左右视图进行立体匹配, 即确定左视图中每个像素点对应的右视图中的像素点, 利用双目立体视觉模型及相机标定参数得到三维点云。

移动机器人使用点云数据进行避障导航需要大量的计算资源来实现, 而且点云数据量较大, 空间点云避障较难达到实时性。因此, 本文通过八叉树结构^[18]构建三维点云, 使用树状结构对点云数据进行结构化描述, 生成占据栅格地图^[19]。

在三维空间中, 利用八叉树结构来描述当前时刻环境的三维点云, 不仅可准确描述井下复杂的三维环境, 而且包含较多的空间结构信息。采用占据栅格地图对点云空间分布进行映射, 对当前障碍物分布进行结构化描述, 移动机器人根据障碍物分布情况, 结合避障策略进行智能避障, 避免与障碍物发生碰撞。

八叉树结构模型如图 2 所示。新建八叉树时, 首先要设置最大递归深度为当前点云的分辨率, 然后从中心节点出发向下扩张, 每次分为 8 个子节点, 直到扩张到叶子节点, 即最大递归深度时不再向下扩张分解。

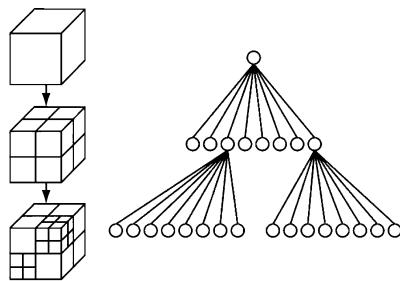


图2 八叉树结构模型

Fig. 2 Octree structure model

通过八叉树结构模型构建三维点云并将其映射到占据栅格地图, 其中每个叶子节点表示占据栅格地图中最小分辨率的立方体块, 用 $0 \sim 1$ 之间的浮点数表示其被占据的概率, 浮点数为 0.5 表示当前立方体不确定, 浮点数大于 0.5 表示占据概率较大, 浮点数小于 0.5 表示占据概率较小。利用占据栅格地图, 根据不同的避障策略设计不同分辨率下的八叉树结构, 进行复杂环境下的三维空间环境感知。

2 模糊控制理论

移动机器人在煤矿井下作业时, 因井下环境过于复杂, 难以构建较为准确的三维地图模型, 而且在矿难发生后, 井下环境发生了巨大变化, 难以使用前期构建的环境模型来控制移动机器人作业。模糊控制理论能够模拟人类解决问题的思维方式, 将不确定的变量信息转换为经验性的知识应用到模糊控制算法中^[20], 使用不确定变量关系来描述事物之间的关系, 用隶属度函数表达不确定性大小。

模糊控制算法是基于规则的控制算法, 其结构如图 3 所示, 主要由输入变量、模糊化、模糊决策、去模糊化和输出变量部分构成: ① 将原始的采集数据

作为输入变量;② 对输入变量进行模糊化,使其具有不确定特征,构建相应隶属度函数对输入变量进行控制;③ 根据模糊决策计算输出量;④ 将模糊输出量进行去模糊化,得到清晰的输出变量即控制量。利用模糊控制来描述井下复杂的障碍物分布情况,根据障碍物与井下移动机器人之间的模糊距离关系,运用模糊语言(如障碍物距离机器人远、近),并引入人类驾驶技术先验知识来构建井下移动机器人的避障策略。

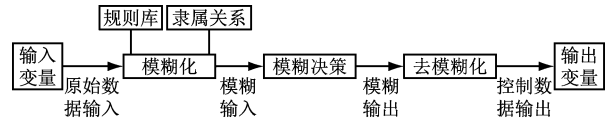


图 3 模糊控制算法结构

Fig. 3 Fuzzy control algorithm structure

3 基于模糊控制算法的井下移动机器人避障方法

井下移动机器人避障方法由障碍物检测、障碍物分布情况和避障策略 3 个部分组成,如图 4 所示。采用双目立体视觉模组作为障碍物检测传感器,感知井下环境信息,实时检测障碍物分布情况,并构建占据栅格地图。由于井下环境信息极为复杂,检测到障碍物后,采用模糊控制策略对实时检测到的障碍物在占据栅格地图中的分布情况进行处理,避免在障碍物检测中因数据不准确而导致井下移动机器人不能及时做出避障决策控制。将当前时刻障碍物在占据栅格地图中的分布情况和井下移动机器人运行速度作为模糊控制器的输入变量,通过模糊控制算法计算下一时刻机器人的转向角度和加速度。井下移动机器人模糊控制避障方法的模糊控制模型为

$$K = f(q) \tag{4}$$

式中: $K = \{\text{转向角度, 加速度}\}$; $q = \{\text{左侧障碍物距离, 左中侧障碍物距离, 右中侧障碍物距离, 右侧障碍物距离, 行驶速度}\}$ 。

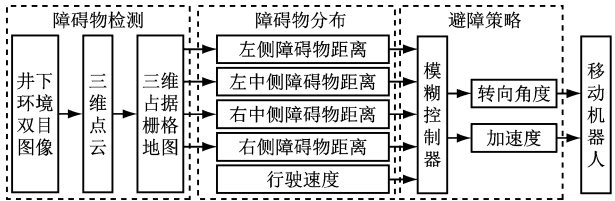


图 4 基于模糊控制算法的井下移动机器人避障方法

Fig. 4 Obstacle avoidance method of underground mobile robot based on fuzzy control algorithm

为了构建一个能够稳定运行并且能连续检测障碍物分布的控制策略,本文由双目立体视觉模组对井下环境进行实时感知,根据生成的三维点云构建占据栅格地图,将障碍物具体大小位置映射为二维占据栅格地图,将占据栅格地图以移动机器人为中

心分为左(L),左中(LM),右中(RM)和右(R)4 个障碍物区域,障碍物区域分布情况如图 5 所示,实时检测各区域中距离移动机器人最近的障碍物距离。

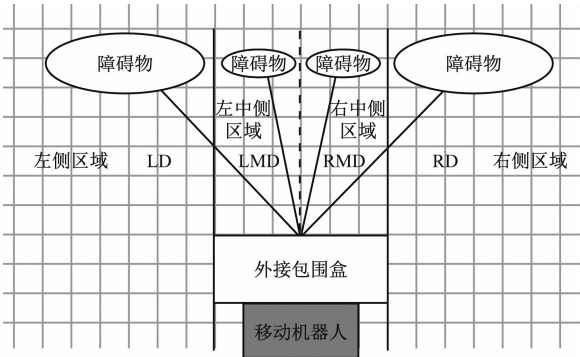


图 5 障碍物区域分布情况

Fig. 5 Distribution of obstacles area

为避免机器人发生碰撞,根据机器人实际占据空间,设计外接包围盒进一步稳定模糊控制算法,避免碰撞等意外情况发生。利用 Matlab 设计模糊控制算法的仿真实验,根据障碍物区域分布设置为 5 个部分,整体仿真设计如图 6 所示。

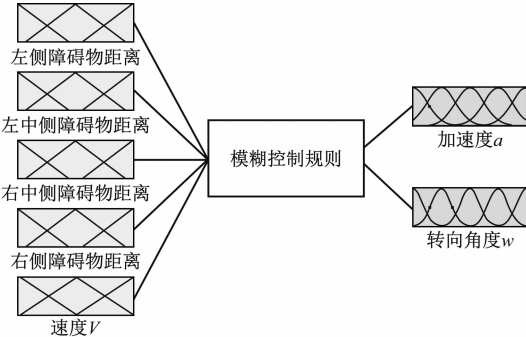


图 6 模糊控制算法整体仿真设计

Fig. 6 Overall simulation design of fuzzy control algorithm

利用模糊控制语言 LD,LMD,RMD,RD 表示左、左中、右中、右 4 个区域中障碍物距离,对于模糊控制器输入的距离信息{LD,LMD,RMD,RD},使用{F,M,N}3 个模糊语言来表示远、中、近,根据井下环境及经验设置障碍物距离探测的论域范围为[0.5 m,5 m],若检测距离大于 5 m,则记为 5 m,如图 7 所示。对于速度 V,使用{LE,FE,HE}分别表示慢速、中速、快速,其论域范围为[0,3 m/s],如图 8 所示。

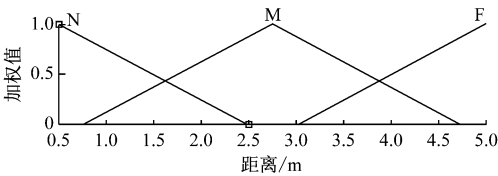


图 7 距离输入隶属度函数

Fig. 7 Distance input membership function

模糊控制算法的输出是下一时刻移动机器人的转向角度 ω 和加速度 a ,其中转向角度用模糊语言

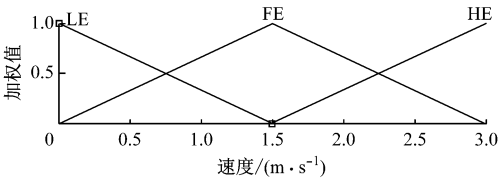


图 8 速度输入隶属度函数

Fig. 8 Speed input membership function

{LW,LMW,W,RMW,RW} 分别表示左转、稍向左转、直行、稍向右转、右转,根据双目视觉模组所设计的 120° 视场角,将其论域设为 $[-60^{\circ},60^{\circ}]$,如图 9 所示。加速度用模糊语言 {L,LA,MA,HA,H} 来表示减速、缓慢减速、不变、缓慢加速、加速,其论域的输出范围为 $[-2\text{ m/s}^2,2\text{ m/s}^2]$,如图 10 所示。

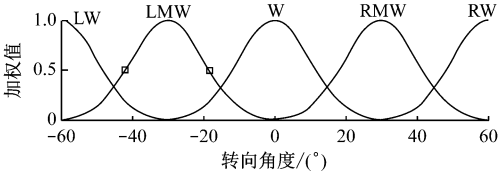


图 9 转向角度输出隶属度函数

Fig. 9 Steering angle output membership function

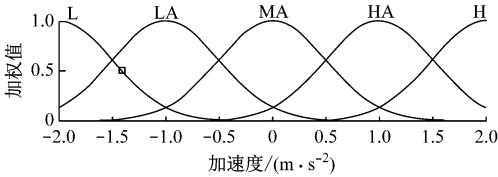


图 10 加速度输出隶属度函数

Fig. 10 Acceleration output membership function

根据井下障碍物的分布情况设计移动机器人模糊控制避障需遵循以下原则：

- (1) 当前方 4 个区域中所有的障碍物距离较远时,移动机器人转向角度保持不变,加速度根据当前实际运行速度进行控制。
- (2) 当左侧区域中障碍物距离较近时,控制移动机器人向右运动,转向角度根据右侧障碍物的距离分布进行控制,加速度减小,距离右侧障碍物较近时同理。
- (3) 当前方左中侧障碍物距离较近时,控制移动机器人向右运动,加速度减小,距离右中侧障碍物较近时同理。

根据模糊控制避障算法中输入数据涉及的变量共得到 $3\times3\times3\times3\times3=243$ 条模糊规则,其中,当左侧、左中及右中区域中障碍物距离较远时,部分控制规则见表 1。

模糊控制器根据模糊控制规则表的推理得到转向角度和加速度模糊量数据,为了精准控制移动机器人运动,需进行去模糊化。将移动机器人转向角度和加速度采用重心法去模糊化,得到准确的移动机器人控制数据,控制移动机器人进行运动。去模

表 1 模糊控制规则

Table 1 Fuzzy control rules

LD	LMD	RMD	RD	V	ω	a
F	F	F	F	HE	W	MA
F	F	F	F	FE	W	HA
F	F	F	F	LE	W	H
F	F	F	M	HE	W	MA
F	F	F	M	FE	W	HA
F	F	F	M	LE	W	H
F	F	F	N	HE	W	MA
F	F	F	N	FE	W	HA
F	F	F	N	LE	W	H

糊化计算公式为

$$G=\frac{\sum_{i=1}^4\mu_{Z_i}Z_i}{\sum_{i=1}^4\mu_{Z_i}}$$

(5)

式中:G 为准确的控制输出数据; Z_i 为论域上的元素; μ_{Z_i} 为隶属度。

4 实验结果与分析

使用 Matlab 仿真软件中的模糊控制工具箱对本文设计的井下移动机器人模糊控制器进行仿真验证。将双目视觉模组采集的当前障碍物距离分布情况作为输入信息,利用模糊控制器(式(5))计算出相应的加速度和转向角度。

根据模糊控制算法中的输入和输出变量,分别得到左中侧、右中侧障碍物分布对应的转向角度曲面和加速度曲面,如图 11、图 12 所示。从图 11、图 12 可看出,对应各区域障碍物分布,转向角度和加速度能够较为平滑地进行过渡,证明了该控制策略的稳定性。

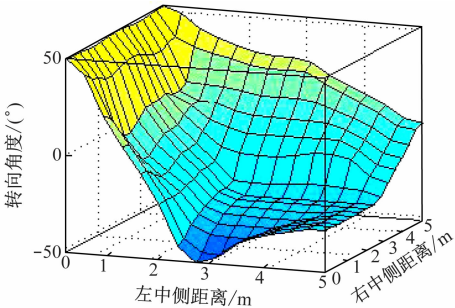


图 11 转向角度模糊控制输入输出曲面

Fig. 11 Steering angle fuzzy control input and output surface

通过 Matlab 设计仿真实验,随机设置模拟障碍物分布情况。移动机器人智能避障仿真实验如图 13 所示,白色椭圆区域为障碍物区域,灰色方格为移动机器人沿途躲避随机生成的障碍物而形成的

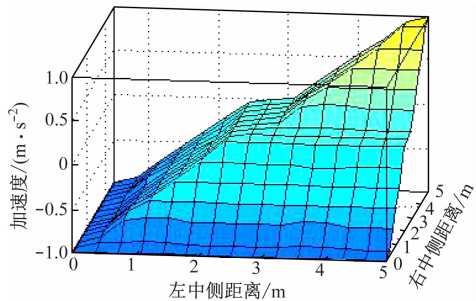


图 12 加速度模糊控制输入输出曲面

Fig. 12 Acceleration fuzzy control input and output surface

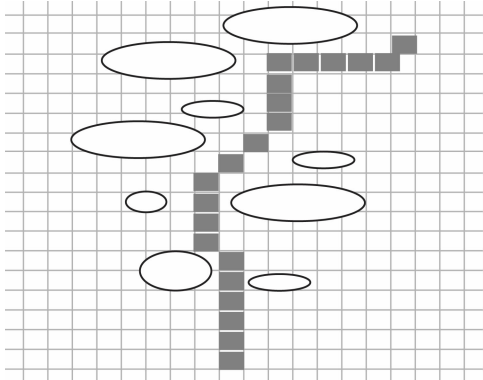


图 13 移动机器人避障仿真实验

Fig. 13 Mobile robot obstacle avoidance simulation experiment

运动轨迹。利用模糊控制规则实时将移动机器人检测到的障碍物信息(图中白色区域)作为模糊控制的输入,进而得到移动机器人的运行速度和转向角度,从而生成移动机器人的行走路径。

从图 13 可看出,井下移动机器人能够根据模糊控制规则自主地避开障碍物,实现智能避障控制,并对障碍物分布情况进行预警。

5 结论

(1) 构建了一种井下移动机器人智能视觉避障方法。采用双目立体视觉模组对井下环境进行感知,实时检测障碍物分布情况,并将其映射到占据栅格地图中;结合模糊控制策略设计避障算法,利用移动机器人外接包围盒简化模糊控制规则,提高算法的实时性,能够较为准确地控制移动机器人运动,并对行进区域的障碍物分布情况进行预警判断,从而实现移动机器人的智能避障和稳定运行。

(2) 随着人工智能技术的不断发展,多传感器融合、路径规划、视觉导航等都是井下移动机器人研究的热点方向,下一步工作将利用多传感器融合策略、结合机器视觉模组准确感知井下环境信息,进一步提高井下移动机器人环境感知能力和智能避障越障能力。

参考文献 (References):

[1] 李芳玮,胡而已,张冬阳. 煤矿机器人研发应用现状及

趋势[J]. 中国煤炭,2019,45(7):28-32.
LI Fangwei, HU Eryi, ZHANG Dongyang. Research and development status and trend of coal mine robot [J]. China Coal, 2019, 45(7): 28-32.
[2] 孙继平. 煤矿信息化与自动化发展趋势[J]. 工矿自动化,2015,41(4):1-5.
SUN Jiping. Development trend of coal mine information and automation [J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(4): 1-5.
[3] 鲁方杰. 机器人技术在煤矿自动化中的应用研究[J]. 新型工业化,2017,7(3):74-77.
LU Fangjie. Research on applying robot technology in coal mine automation [J]. The Journal of New Industrialization, 2017, 7(3): 74-77.
[4] 温良,叶锦娇,张立亚. 煤矿救灾机器人超声波和惯性导航技术[J]. 煤矿安全,2017,48(6):127-130.
WEN Liang, YE Jinjiao, ZHANG Liya. Ultrasonic and inertial navigation technology of coal mine rescue robot [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(6): 127-130.
[5] 王勇,李允旺,田鹏,等. 煤矿救灾机器人发展历程分析及展望[J]. 矿山机械,2018,46(5):1-10.
WANG Yong, LI Yunwang, TIAN Peng, et al. Analysis and prospect on development course of colliery rescue robots [J]. Mining & Processing Equipment, 2018, 46(5): 1-10.
[6] 由韶泽,朱华,赵勇,等. 煤矿救灾机器人研究现状及发展方向[J]. 工矿自动化,2017,43(4):14-18.
YOU Shaoze, ZHU Hua, ZHAO Yong, et al. Research status of coal mine rescue and its development direction [J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(4): 14-18.
[7] 张旭辉,董润霖,马宏伟,等. 基于虚拟现实的煤矿救援机器人远程控制技术[J]. 煤炭科学技术,2017,45(5):52-57.
ZHANG Xuhui, DONG Runlin, MA Hongwei, et al. Study on remote control technology of mine rescue robot based on virtual reality [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 52-57.
[8] WANG Chuanwei, MA Hongwei. Lightweight design for coal mine rescue robot's swing arm brackets [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 496/497/498/499/500: 657-661.
[9] 贾瑞清,李长亮,江涛,等. 矿井移动机器人的超声波避障系统设计[J]. 机电产品开发与创新,2011,24(3):23-25.
JIA Ruiqing, LI Changliang, JIANG Tao, et al. Design of ultrasonic obstacle avoidance system based on the mine mobile robot [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2011, 24(3): 23-25.
[10] 许心德,关胜晓. 未知环境下基于 VFH* 的机器人避障[J]. 计算机仿真,2010,27(3):156-160.
XU Xinde, GUAN Shengxiao. Obstacle avoidance for

- robots based on VFH* method in uncertain environment[J]. Computer Simulation, 2010, 27(3): 156-160.
- [11] 刘欢,王健,李金凤,等. 未知环境下机器人避障设计研究[J]. 机械设计与制造, 2013(10): 236-238.
LIU Huan, WANG Jian, LI Jinfeng, et al. Design of robot obstacle avoidance in unknown environment[J]. Machinery Design & Manufacture 2013 (10): 236-238.
- [12] 周恺. 信息素模糊逻辑导引的机器人室内避障算法[J]. 科技通报, 2015, 31(12): 220-222.
ZHOU Kai. Indoor robot obstacle avoidance algorithm introduction of pheromone fuzzy logic guidance[J]. Bulletin of Science and Technology, 2015, 31(12): 220-222.
- [13] 徐斌,卜祥丽,张玉洁. 基于机器视觉的井下搜救机器人路径规划[J]. 煤矿机械, 2015, 36(6): 247-248.
XU Bin, BU Xiangli, ZHANG Yujie. Path planning for rescue robot based on machine vision in underground[J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(6): 247-248.
- [14] 肖雪,秦贵和,陈筠翰. 基于光流的自主移动机器人避障系统[J]. 计算机工程, 2013, 39(10): 305-308.
XIAO Xue, QIN Guihe, CHEN Yunhan. Autonomous mobile robot obstacle avoidance system based on optical flow[J]. Computer Engineering, 2013, 39(10): 305-308.
- [15] 罗尤春,孙容磊. 机器视觉理论及应用[J]. 软件导刊, 2014(3): 13-14.
- LUO Youchun, SUN Ronglei. Theory and application of machine vision [J]. Software Guide, 2014 (3): 13-14.
- [16] ZHANG Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22 (11): 1330-1334.
- [17] ZHANG Xiaoxue, LIU Zhigang. A survey on stereo vision matching algorithms [C]//Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control & Automation, 2015: 2026-2031.
- [18] 吕宏武,付俊强,王慧强,等. 基于八叉树的三维室内地图数据快速检索方法[J]. 计算机应用, 2019, 39(1): 82-86.
LYU Hongwu, FU Junqiang, WANG Huiqiang, et al. Fast retrieval method of three-dimensional indoor map data based on octree [J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(1): 82-86.
- [19] LEE T K, BAEK S H, CHOI Y H, et al. Smooth coverage path planning and control of mobile robots based on high-resolution grid map representation[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2011, 59 (10): 801-812.
- [20] 王志腾. 基于模糊控制的机器人避障算法研究[J]. 科技创新与应用, 2018, 242(22): 87-88.
WANG Zhiteng. Research on obstacle avoidance algorithm of robot based on fuzzy control [J]. Technology Innovation and Application, 2018, 242(22): 87-88.