文章编号:1671-251X(2020)08-0064-06　　DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020020003

基于新型栅格启发式算法的矿井机器人路径规划

王鹤，　陈静，　滕瑛瑶

（河南工程学院 机械工程学院，河南 郑州　451191）

扫码移动阅读

摘要:在传统正方形栅格地图中，存在机器人遇到障碍物时沿对角线方向移动易与障碍物碰撞，其绕障和平稳性等方面的能力较差且实时探测过程中每步消耗的时间无法唯一确定等问题。针对上述问题，提出了以正六边形栅格化的工作环境为基础，采用改进的启发式路径搜索算法对多个并行移动的矿井机器人进行路径优化的方法。从绕障转角、绕障能力及最优路径 3 个方面，对单个机器人在正方形和正六边形栅格建模环境中的运动性能进行比较分析，结果表明:就单个机器人来说，正六边形栅格地图下的路径长度代价小于正方形栅格地图的路径长度代价;从单个机器人的路径规划来看，正六边形栅格地图更有利于获得最短路径，从而得出正六边形栅格比传统正方形栅格更适合于机器人工作环境的建模。针对多个协同操作的机器人并行移动的路径规划问题，在正六边形栅格化的工作空间建模基础上，采用改进的启发式路径搜索算法对多个机器人的路径进行优化:采用改进的启发式估计函数规划多个协同操作的机器人路径，该函数决定了当前机器人所在位置周围所有相邻栅格中哪一个即将被机器人遍历。依据机器人已经遍历的栅格数和候选栅格与该机器人目标栅格之间的变形曼哈顿距离，该启发式估计函数可评估出相邻栅格的适应度值。仿真结果表明:正六边形栅格地图在路径总长及算法运行时间上均比正方形栅格地图减少了 10%以上，且有效避免了机器人与静态障碍物之间及机器人之间发生碰撞，提高了机器人的安全性;随着机器人数量的增多，改进的启发式路径搜索算法对正六边形栅格地图的机器人路径和算法运行时间的优化作用更加明显。

关键词:矿井机器人路径规划；路径优化；启发式路径搜索算法；正六边形栅格；静态障碍物；动态障碍物

中图分类号:TD77　　文献标志码:A

Path planning of mine robot based on a novel heuristic algorithm with regular hexagon grids

WANG He,　CHEN Jing,　TENG Yingyao

(Mechanical Engineering Department, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: In the traditional square grid map, when robot encounters an obstacle, it is easy to collide with the obstacle when moving along diagonal direction, has poor capability in obstacle-avoiding and stability, and time consumed in each step during real-time detection cannot be uniquely determined. In view of the above problems, based on working environment of regular hexagon grid, a path optimization method for multiple parallel mobile mine robots by using improved heuristic path search algorithm is proposed. In this paper, a comparative analysis of single robot in square and regular hexagon grid modeling environment is carried out from three aspects of obstacle-avoiding angle, obstacle-avoiding ability and optimal path. The results show that for a single robot, path length cost under regular hexagon grid map is less than that in square grid map, and from path planning of a single robot, regular hexagon grid map is more conducive to obtain the shortest path, so it is concluded that regular hexagon grid is more suitable for robot working environment modeling than traditional square grid. Aiming at path planning problem of

收稿日期:2020-02-05;**修回日期**:2020-03-12;**责任编辑**:王晖,郑海霞。

基金项目:河南省科技攻关项目(182102310769)。

作者简介:王鹤(1981－),女,河南郑州人,讲师,硕士,研究方向为智能机器人技术,E-mail:wanghejxr@163.com。

引用格式:王鹤,陈静,滕瑛瑶.基于新型栅格启发式算法的矿井机器人路径规划[J].工矿自动化,2020,46(8):64-69.

WANG He,CHEN Jing,TENG Yingyao. Path planning of mine robot based on a novel heuristic algorithm with regular hexagon grids [J]. Industry and Mine Automation,2020,46(8):64-69.

parallel movement of multiple robots in collaborative operation, an improved heuristic path search algorithm is used to optimize path of multiple robots on the basis of working environment of regular hexagon grid: Multiple collaborative robot paths are planned by use of improved heuristic estimation function, which determines the one of all adjacent grids around the current robot location to be traversed by the robot. The improved heuristic estimation function is used to plan the path of multiple cooperative robots. According to the number of grids traversed by robot and deformed Manhattan distance between candidate grid and target grid of the robot, the heuristic estimation function can evaluate fitness value of adjacent grids. The simulation results show that total path length and running time of the algorithm are reduced by more than 10% compared with the square grid map, collision between the robot and static obstacles and among the robots is effectively avoided, and safety of the robot is improved. With increase of the number of robots, the improved heuristic path search algorithm has more obvious optimization effect on robot path and algorithm running time under the regular hexagon grid map.

Key words: path planning of mine robot; path optimization; heuristic path search algorithm; regular hexagon grid; static obstacle; dynamic obstacle

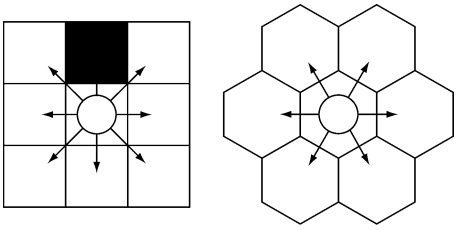
0　引言

为了避免煤矿次生灾害对被困矿工及救护人员造成严重伤害,进一步提高救援工作效率和成功率,机器人路径规划问题已成为矿井类机器人研究的核心内容之一[1-2]。为了使机器人可以准确找到事故发生地点,并确认安全路径营救被困矿工,寻找一条距离最短、耗时最少的路径非常重要[3-4]。

在研究机器人路径规划[5-7]时,通常将其运动区域抽象简化成若干个形状规则、大小相同的栅格,以栅格的特征信息描述实际地形。栅格法[8-11]对障碍物的适应能力较强,大大降低了工作环境建模的复杂性。研究者通常选择正方形作为栅格形状,在正方形栅格化的工作地图中,当机器人位于某个栅格时,沿水平或竖直方向和沿对角线方向移动。在实际路径规划中,当遇到障碍物时,若沿对角线方向移动,易与障碍物发生碰撞;机器人在绕障和平稳性等方面的能力较差[12-13];矿难发生后在实时探测过程中每步消耗的时间无法唯一确定,这对救援造成重大影响。针对上述问题,本文提出了以正六边形栅格化的工作地图为基础,结合改进的启发式路径搜索算法对多个并行移动的机器人进行路径规划的方法,能够有效减少井下多个机器人并行工作的路径长度及探测救援时间,为矿难发生后救援工作的开展争取了宝贵时间。

1　2 种地图模型对比分析

将机器人的工作空间分别进行正方形和正六边形栅格化,如图 1 所示。图中圆圈为机器人,白色栅格为自由栅格,黑色栅格为静态障碍物。在正六边形栅格(即蜂窝栅格)化的工作地图中,机器人可移动的方向最多有 6 个,如图 1(b)所示,即使相邻栅格有障碍物,沿其余任一方向移动时,也不会出现在正方形栅格中沿对角线方向移动可能与障碍物发生碰撞的情况,安全性更高。



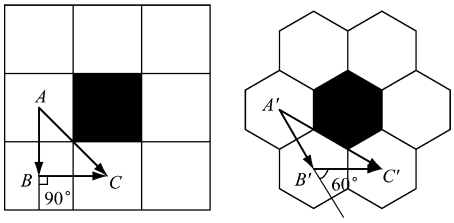
(a) 正方形　　(b) 正六边形

图 1　栅格结构

Fig. 1　Grid structure

假设在同一工作环境下的正方形和正六边形地图中,单个机器人移动 1 个栅格位置的距离相同,对其运动性能做比较。

(1) 绕障转角。在遇到静态障碍物时,机器人在传统的正方形栅格地图中移动时,转角为 90°,而在正六边形栅格地图中的转角仅为 60°,如图 2 所示。可见,当遇到静态障碍物需要转弯时,在正六边形栅格地图中转角较小,能够提高机器人运动的安全性[7-8]。为提高运动平稳性,在路径规划过程中,不仅要减小转角,也要尽可能减少机器人转向次数。



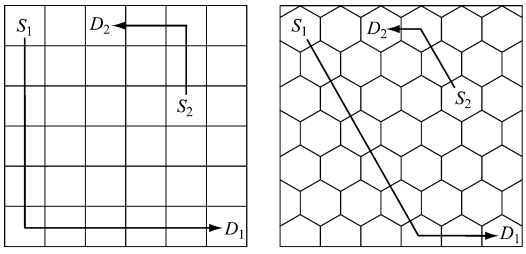
(a) 正方形栅格　　(b) 正六边形栅格

图 2　机器人在 2 种栅格地图中的基本性能对比

Fig. 2　Basic performance comparison of robot in two grid maps

(2) 绕障能力。设正方形栅格边长为 a，正六边形栅格边长为 b，其中 $b=a/\sqrt{3}$，则有 $AB=BC=A'B'=B'C'=a$，$AC=\sqrt{2}a$，$A'C'=\sqrt{3}a$，如图 2 所示。在正方形栅格地图中，从起点 A 移动到终点 C 时，需要绕过障碍物，绕行路径长度($AB+BC$)和直行路径长度(AC)的比值 $\beta=\sqrt{2}$；在正六边形栅格地图中，从起点 A' 移动到终点 C' 时，同样要绕过障碍物，而此时绕行路径长度($A'B'+B'C'$)和直行路径长度($A'C'$)的比值 $\beta'=2/\sqrt{3}$。无论在哪种地图中，当遇到障碍物绕行时，若绕障起点和终点相同，其绕障起点和终点间的直行路径长度相同，即 $AC=A'C'$。假设 $AC=A'C'=1$ mm，则机器人在正六边形栅格中的绕障路径比在正方形栅格中短($\sqrt{2}-2/\sqrt{3}$) mm=0.26 mm。因此，当机器人移动速度不变时，机器人在正六边形栅格中的绕行时间更短，能够更快地绕过障碍物。

(3) 最优路径。图 3 为同一工作空间的正方形和正六边形栅格地图。最优路径以付出代价来衡量，付出代价越少，则路径最优。对于单个机器人路径规划来说，其路径越短，耗时也越短。因此单个机器人路径规划目标就是其路径长度代价最小。设机器人移动 1 个栅格的路径长度代价为 w，那么 1 条路径的长度代价为 nw(n 为自然数)。对于正方形栅格地图，1 条路径的长度代价即起点与终点之间的曼哈顿距离[14-15]。在正六边形栅格中，从起点开始沿靠近终点且与水平相交 60°方向移动，直至移动到与终点同一行的栅格，将该栅格与起点之间的距离定义为 L_S，该栅格和终点之间的距离定义为 L_D。在正六边形栅格地图中，将上述 2 个距离之和 $L=L_S+L_D$ 定义为变形曼哈顿距离。



(a) 正方形栅格 (b) 正六边形栅格

图 3 工作空间的栅格化及路径规划

Fig. 3 Gridding and path planning of workspace

假设将机器人分别置于起点栅格 S_1 和 S_2，令其分别移动到终点栅格 D_1 和 D_2，2 种地图中起点和对应终点之间的直行距离相同。建立路径网络集合 $N=\{N_1,N_2\}$，其中 $N_i=\{S_i,D_i\}$，$i=1,2$。机器人在 2 种地图中的路径长度代价见表 1。

表 1 机器人路径长度代价

Table 1 Path length cost of robot

路径	正方形栅格地图中路径长度代价/w	正六边形栅格地图中路径长度代价/w
S_1—D_1	10	8
S_2—D_2	4	3

由表 1 可知，就单个机器人来说，正六边形栅格地图下的路径长度代价小于正方形栅格地图的路径长度代价，从单个机器人的路径规划来看，正六边形栅格地图更有利于获得最短路径。

通过 3 个性能方面的分析比较，得出正六边形栅格比传统正方形栅格更适合于机器人工作环境的建模。

2 多个协同操作的机器人启发式路径搜索算法

本文主要研究多个协同操作的机器人并行移动的路径规划问题，在正六边形栅格地图建模的基础上，采用改进的启发式路径搜索算法对多个机器人的路径进行优化。

多个协同操作的机器人路径规划目标是在避免机器人之间碰撞及机器人与障碍物碰撞的前提条件下，最小化每个机器人的路径长度(即路径上的栅格数量)和消耗时间。假设有 m 个机器人，建立路径网络集合 $N=\{N_1,N_2,\cdots,N_i\}$，$i=1,2,\cdots,m$，路径长度由该路径上所用栅格总数乘以 w 来表示，则有

$$\begin{cases} |x_i^t-x_j^t|\geqslant 1 \text{ or } |y_i^t-y_j^t|\geqslant 1 \\ |x_i^{t+1}-x_j^t|\geqslant 1 \text{ or } |y_i^{t+1}-y_j^t|\geqslant 1 \text{ or} \\ \qquad |x_i^t-x_j^{t+1}|\geqslant 1 \text{ or } |y_i^t-y_j^{t+1}|\geqslant 1 \\ \min[g(N_1)\cup g(N_2)\cup\cdots\cup g(N_i)] \end{cases} \tag{1}$$

式中：(x_i^t,y_i^t)，(x_j^t,y_j^t) 分别为第 i 个和第 j 个机器人在 t 时刻的栅格位置，$j=1,2,\cdots,m$；(x_i^{t+1},y_i^{t+1})，(x_j^{t+1},y_j^{t+1}) 分别为第 i 个和第 j 个机器人在 $t+1$ 时刻的栅格位置；$g(N_i)$ 为第 i 个机器人路径上的栅格数量。

采用改进的启发式估计函数来规划多个协同操作的机器人路径，该函数决定了当前机器人所在位置所有相邻栅格中哪一个即将被机器人遍历。依据机器人已经遍历的栅格数 Z_{tn} 和候选栅格与该机器人目标栅格之间的变形曼哈顿距离 L，该启发式估计函数可评估出相邻栅格的适应度值 G_f，函数表达式为

$$G_f=Z_{tn}+L \tag{2}$$

多个协同操作的机器人启发式路径搜索算法流程如图 4 所示。

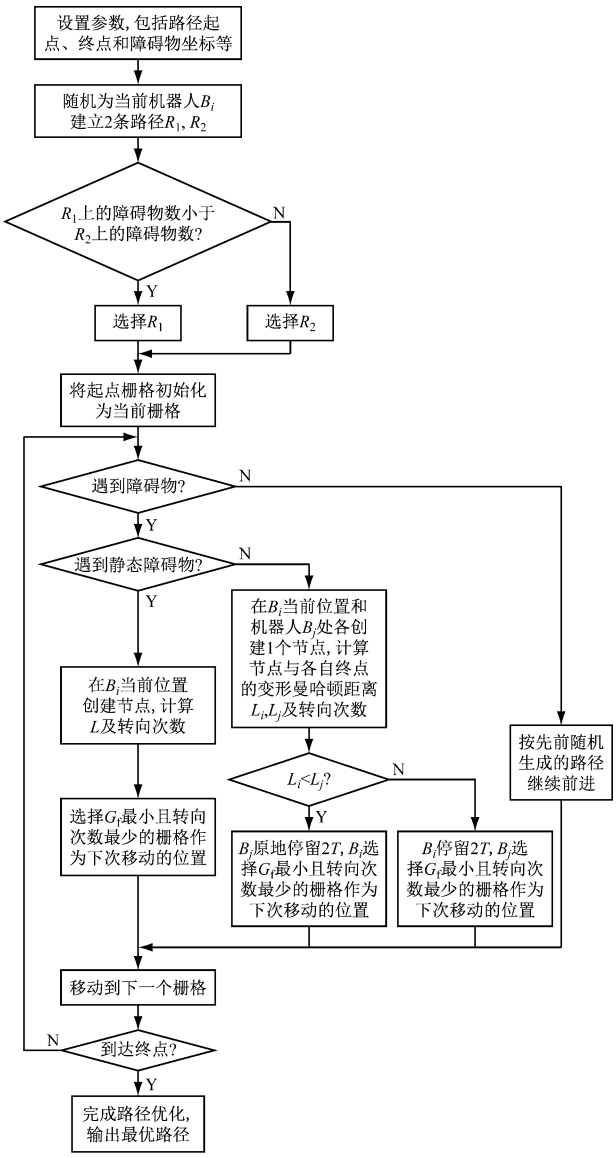


图 4　多个协同操作的机器人启发式路径搜索算法流程

Fig. 4　Flow of heuristic path search algorithm of multiple collaborative robots

（1）设置参数，建立正六边形栅格化的二维环境地图，m 个机器人的路径网络集合 $N=\{N_1, N_2, \cdots, N_i\}$，各个机器人起点、终点及所有障碍物坐标，并初始化路径上遍历的栅格数 $Z_{\mathrm{tn}}=0$ 和机器人路径上遍历的栅格集合为 $\varnothing$。

（2）为当前机器人 B_i 随机生成 2 条路径 R_1，R_2。

（3）比较 2 条路径上的障碍物总数，选择障碍物总数少的路径。

（4）将起点栅格初始化为当前栅格。

（5）判断是否遇到障碍物。若没有遇到，则按先前随机生成的路径 R_1 和 R_2 继续移动；若遇到，则判断是静态障碍物还是动态障碍物。

如果障碍物是静态障碍物，则在当前机器人 B_i 所处栅格创建节点，并计算当前节点栅格所有相邻栅格（障碍物除外）与当前机器人 B_i 的终点栅格 D_i 之间的变形曼哈顿距离 L 及对应路径上的转向次数，由此选择 G_{f} 最小且转向次数最少的相邻栅格作为下一步移动的位置。如果障碍物是动态障碍物，即其他机器人 B_j，分别在 B_i 和 B_j 所在栅格创建 1 个节点，并计算节点栅格所有相邻栅格（B_j 占据的栅格除外）与各自的终点栅格 D_i 或 D_j 之间的变形曼哈顿距离 L_i 和 L_j 及对应路径上的转向次数。如果 $L_i<L_j$，机器人 B_j 原地停留时间为 $2T$（T 为移动 1 个栅格距离所需时间），当前机器人 B_i 选择 G_{f} 最小且转向次数最少的相邻栅格作为其下一步移动的位置；否则，机器人 B_i 停留 $2T$，机器人 B_j 选择 G_{f} 最小且转向次数最少的相邻栅格作为其下一步移动的位置。

（6）移动到下一个栅格，并判断是否到达终点，如果是则停止寻址；否则返回步骤（5），直至到达终点为止。

（7）停止寻址，输出最优路径。

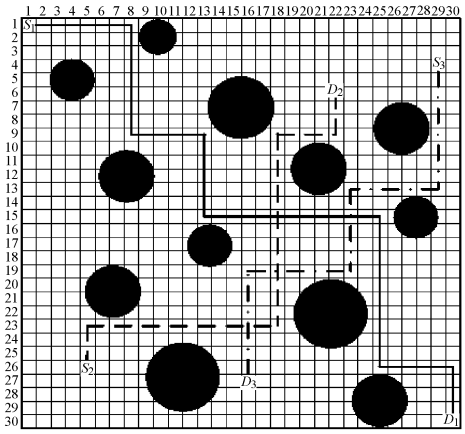
3　仿真实验及结果分析

为了验证基于正六边形栅格地图的多机器人启发式路径搜索算法的可行性和有效性，采用 Matlab 对不同数量机器人的路径规划进行仿真。为了使机器人在 2 种环境地图中的路径具有可比性，将地图中所有静态障碍物看作圆形，在 2 种地图中，每个障碍物的位置和半径都相同，任意机器人的起点和终点位置对应相同。

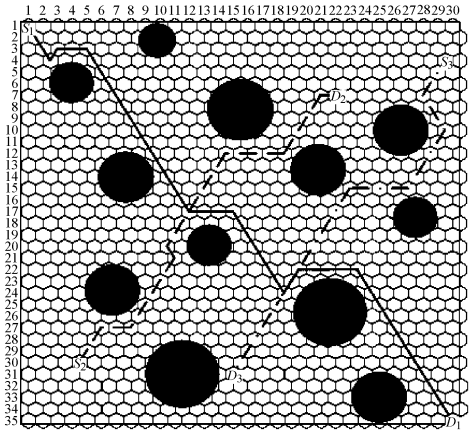
机器人在 2 种地图中移动 1 个栅格的距离相同，同一工作空间分别被分割成 30×30 个正方形栅格和 30×35 个正六边形栅格。3 个机器人并行移动时的路径如图 5 所示。仿真收敛曲线如图 6 所示。不同数量机器人并行移动的路径规划仿真结果见表 2。

由图 5 与图 6 可知，正六边形栅格地图在路径总长及算法的运行时间上均比正方形栅格地图减少了 10%以上，且有效避免了机器人与静态障碍物之间及机器人之间发生碰撞，提高了机器人的安全性。另外，在算法中引入了转向次数，明显提高了机器人运动的平稳性。

由表 2 可知，随着机器人数量增多，改进的启发式路径搜索算法对正六边形栅格地图下的机器人路径和算法运行时间的优化作用更加明显。因此，正六边形栅格地图与改进的启发式路径搜索算法的结合，可实现对多个并行移动机器人路径的优化，且效果显著。



(a) 正方形栅格地图下的路径



(b) 正六边形栅格地图下的路径

图 5 机器人路径

Fig. 5 Robot path

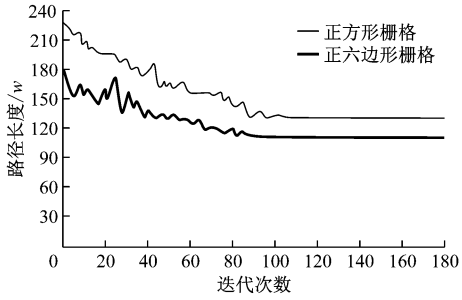


图 6 机器人路径仿真收敛曲线

Fig. 6 Convergence curves of robot path simulation

表 2 不同数量机器人并行移动的路径规划仿真结果

Table 2 Simulation results of path planning for parallel mobile of different number of robots

机器人数量	正六边形栅格地图		正方形栅格地图	
	路径总长/w	算法运行时间/s	路径总长/w	算法运行时间/s
3	110	91	131	105
5	155	150	186	174
7	234	232	279	271
9	302	300	368	365

4 结论

(1) 从绕障转角、绕障能力及最优路径 3 个方面，对单个机器人在正方形和正六边形栅格地图中进行比较分析。在正六边形栅格地图中，遇到静态障碍物转弯时，转角和绕行时间都减小，提高了运动的安全性、平稳性及绕障能力，且最优路径长度有所减小。

(2) 正六边形栅格地图与改进的启发式路径搜索算法的结合，实现了对多个并行移动的矿井机器人路径的优化，达到了各机器人路径最短的优化目标，同时避免了机器人之间及机器人与静态障碍物之间发生碰撞。

(3) 仿真结果表明，正六边形栅格地图在路径总长及算法运行时间上均比正方形栅格地图减少了 10%以上，且有效避免了机器人与静态障碍物之间及机器人之间发生碰撞，提高了机器人的安全性；随着机器人数量增多，改进的启发式路径搜索算法对正六边形栅格地图下的机器人路径和算法运行时间的优化作用更加明显。

参考文献(References)：

[1] WANG Jinhua, YU Bin, KANG Hongpu, et al. Key technologies and equipment for a fully mechanized top-coal caving operation with a large mining height at ultra-thick coal seams[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2015, 2(2): 97-161.

[2] WANG Jinhua. Development and prospect on fully mechanized mining in Chinese coal mines [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3): 253-260.

[3] 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 robot and its development direction[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(4): 14-18.

[4] 李猛钢. 煤矿救援机器人导航系统研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2017.
LI Menggang. Research on navigation system of coal mine rescue robot[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.

[5] 曾辰，许瑛. 一种蜂巢栅格下机器人路径规划的蚁群算法[J]. 机械科学与技术，2016，35(8)：1308-1312.
ZENG Chen, XU Ying. An ant colony algorithm for robot path planning in a honeycomb grid [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace

Engineering,2016,35(8):1308-1312.

[6] 曹策俊,李从东,杨琴,等.模拟植物生长算法在组合优化问题中的应用:研究进展[J].技术经济,2017,36(5):127-136.
CAO Cejun, LI Congdong, YANG Qin, et al. Application of plant growth simulation algorithm in combinatorial optimization problem: study progress [J]. Technology Economics,2017,36(5):127-136.

[7] 卜新苹,苏虎,邹伟,等.基于非均匀环境建模与三阶 Bezier 曲线的平滑路径规划[J].自动化学报,2017,43(5):710-724.
BU Xinping, SU Hu, ZOU Wei, et al. Smooth path planning based on non-uniformly modeling and cubic Bezier curves [J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(5):710-724.

[8] 朱大奇,颜明重.移动机器人路径规划技术综述[J].控制与决策,2010,25(7):961-967.
ZHU Daqi,YAN Mingchong. Survey on technology of mobile robot path planning[J]. Control and Decision, 2010,25(7):961-967.

[9] 蒋家志,刘国.多机器人智能仓储系统中智能调度的研究[J].机电工程技术,2017,46(9):82-84.
JIANG Jiazhi, LIU Guo. Research on intelligent scheduling in multi-robot intelligent warehouse system [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology,2017,46(9):82-84.

[10] 夏梁盛,严卫生.基于栅格法的移动机器人运动规划研究[J].计算机仿真,2012,29(12):229-233.
XIA Liangsheng, YAN Weisheng. Study on mobile robot motion planning based on grid method [J]. Computer Simulation,2012,29(12):229-233.

[11] 程向红,祁艺.基于栅格法的室内指示路径规划算法[J].中国惯性技术学报,2018,26(2):236-240.
CHENG Xianghong, QI Yi. Indoor indicator path planning algorithm based on grid method[J]. Journal of Chinese Inertial Technology,2018,26(2):236-240.

[12] 姚成信,王冠凌,陈孟元.基于 HGM 与 TGSA 的机器人路径规划算法研究[J].安徽工程大学学报,2018,33(2):51-57.
YAO Chengxin,WANG Guanling,CHEN Mengyuan. Research on robot path planning algorithm based on HGM and TGSA[J]. Journal of Anhui Polytechnic University,2018,33(2):51-57.

[13] 姚成信.基于树生长模拟算法的移动机器人路径规划研究[D].芜湖:安徽工程大学,2018.
YAO Chengxin. Research on path planning of mobile robot based on tree growth simulation algorithm[D]. Wuhu:Anhui Polytechnic University,2018.

[14] 赵玉娟,刘擎超.基于混合多距离度量的多分类器加权集成研究[J].计算机工程,2012,38(21):171-174.
ZHAO Yujuan,LIU Qingchao. Research on weighted integration of multiple classifier based on hybrid multiple distance measurement [J]. Computer Engineering,2012,38(21):171-174.

[15] NEERENDRA K, ZOLTAN V, ZSOLT M S. Heuristic approaches in robot navigation[C]//IEEE 20th Jubilee International Conference on Intelligent Engineering Systems,Budapest,2016:219-222.