

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.06.002

基于改进 A* 算法的 UUV 冰下避障航迹规划算法

程建华, 李鹏程, 管 行, 葛靖宇

(哈尔滨工程大学智能科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对冰下避障航迹规划问题, 提出了一种基于改进 A* 算法的三维冰下避障航迹规划算法。不同于传统的 A* 航迹规划算法, 该算法结合了人工势场航迹规划算法的思想, 将水下地形碰撞约束、海冰碰撞约束以及 UUV 巡航高度约束重新编排。算法分析表明, 该避障航迹规划算法能够有效增强 UUV 冰下避障能力与定深巡航高度控制能力。基于改进的 A* 冰下避障航迹规划算法, 给出了上述约束的设计方法并进行了仿真验证。仿真结果表明, 基于上述约束的航迹规划算法具有良好的避障能力、巡航高度控制能力以及航行距离控制能力。

关键词: 航迹规划; A* 搜索算法; UUV; 避障; 海冰

中图分类号: TJ630.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2021)06-0013-06

Path Planning Algorithm for UUV Obstacle Avoidance Under Ice Based on Improved A* Algorithm

CHENG Jian-hua, LI Peng-cheng, GUAN Hang, GE Jing-yu

(College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at the problem of path planning for obstacle avoidance under ice, a three-dimensional path planning algorithm for obstacle avoidance under ice based on improved A* algorithm is proposed. Different from the traditional A* path planning algorithm, this algorithm combines the idea of artificial potential field path planning algorithm, and rearranges the underwater terrain collision constraint, sea ice collision constraint and UUV cruise height constraint. Algorithm analysis shows that the obstacle avoidance path planning algorithm can effectively enhance the ability of UUV to avoid obstacles under ice and the control ability of fixed depth cruise altitude. Based on the improved A* path planning algorithm, the design method of the above constraints is given and the simulation experiment is carried out. The test results show that the path cost-effective method based on the above constraints has good obstacle avoidance ability, cruise height control ability and distance control ability.

Key words: Path planning; A* search algorithm; UUV; Obstacle avoidance; Sea ice

0 引言

北极拥有极为丰富的自然资源, 还是亚、欧、北

美三大洲的延伸汇集地, 有联系三大洲的最短大弧航线, 具有极其重要的战略意义。由于北极地区被较厚冰盖覆盖, 冰下航行是重要的战略手段, 因此

收稿日期: 2021-07-07; 修订日期: 2021-08-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(62073093); 黑龙江省杰出青年基金(JC2018019); 中央高校基本科研业务费专项基金(3072020CFT0403)

作者简介: 程建华(1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事惯性导航及组合导航方面的研究。

开展水下无人潜航器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)北极冰下航迹自主规划技术研究,对于提高我国载人/无人潜航器极区冰下安全航行能力,具有重要的实际意义和应用价值^[1]。

UUV 在实际的航行过程中,其运动过程较为复杂,所以规划出一条符合 UUV 运动状态的航迹难度较高。国内外虽有多项研究成果,如蚁群优化算法^[2]、遗传算法^[3]和人工势场算法^[4]等,但这些航迹规划算法各有其局限性^[5]。在复杂环境下,UUV 的航迹规划是一个复杂的多约束问题^[6],且冰下航迹规划领域研究几乎为空白。航迹规划需要综合考虑地形碰撞约束、海冰碰撞约束、潜航器航行性能以及任务需求等各种因素,规划出一条符合上述所有约束条件的航迹。忽略约束条件或单纯强调目标搜索的规划方法很难适应 UUV 的真实运动情况^[7]。

本文结合传统人工势场航迹规划算法的思想,将海底地形碰撞约束、海冰碰撞约束和 UUV 巡航高度约束重新编排为人工势场斥力约束,并给出了这三种约束的人工势场设计方法。将这些约束因素与 A* 搜索算法的代价函数组合,得到改进的 A* 冰下航迹规划算法。最后,通过仿真验证了该算法可生成满足任务需求的冰下航迹。

1 UUV 航迹规划约束条件

1.1 动力学约束

UUV 在水下正常航行过程中,可将其视为一个满足动力学约束条件的六自由度运动刚体结构。由于横滚角与航迹无直接联系,因此本文主要考虑 UUV 的纵倾与艏摇约束条件^[8]。设其纵倾角速度为 q ,纵倾角为 θ ,最大纵倾安全角速度为 q_{\max} ,最大纵倾安全角为 θ_{\max} ,所以 UUV 的纵倾约束为^[6]

$$\begin{cases} -q_{\max} \leq q \leq q_{\max} \\ -\theta_{\max} \leq \theta \leq \theta_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

同理,可以得知 UUV 的艏摇约束为

$$\begin{cases} -r_{\max} \leq r \leq r_{\max} \\ -\psi_{\max} \leq \psi \leq \psi_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

其中,艏摇角速度为 r ;艏摇角为 ψ ;最大艏摇安全角速度为 r_{\max} ;最大艏摇安全角为 ψ_{\max} 。若 UUV 运动角速度或者角度超出安全范围,则会出现失控状态。

1.2 防碰撞约束

在进行 UUV 冰下航迹规划时,需要使航迹与海底地形以及海冰保持安全距离,防止发生碰撞。

设 UUV 距地形与海冰的垂直安全距离分别为 ϵ_{obs} 和 ϵ_{ice} ,距地形与海冰的实际垂直距离分别为 x_{obs} 和 x_{ice} ,在整个航迹规划过程中,需满足如下约束

$$\begin{cases} \epsilon_{\text{obs}} \leq x_{\text{obs}} \\ \epsilon_{\text{ice}} \leq x_{\text{ice}} \end{cases} \quad (3)$$

1.3 定深巡航高度约束

UUV 在执行勘测或巡逻任务时,为了获得更好的隐蔽效果,减小被声纳发现的概率,需要使 UUV 在某一确定高度从起点保持定深巡航至终点。定深巡航高度约束是整个航迹规划过程中必须考虑的问题。设 UUV 执行任务的目标深度为 h_{task} ,其实际巡航深度为 h ,任务可接受的巡航深度最大偏差为 h_e 。定深巡航约束应满足如下公式

$$|h - h_{\text{task}}| \leq h_e \quad (4)$$

除此之外,UUV 还会受材料、工艺技术以及密封性的限制,存在一个最大工作深度 H ,所以其巡航深度应同时满足

$$h \leq H \quad (5)$$

1.4 能量约束

因为 UUV 是携带燃料或者蓄能电池的水下无人潜航器,所以其航行距离 s 不能超过 UUV 的最大航程 S ,其约束为

$$s \leq S \quad (6)$$

2 基于改进的 A* 航迹规划算法

2.1 传统 A* 航迹搜索算法

A* 航迹搜索算法是一种常见的航迹搜索算法,适用于较大范围地形的航迹搜索。该算法为基于迪杰斯特拉(Dijkstra)航迹搜索算法,同时结合广度优先搜索(Breadth-First-Search, BFS)算法的启发式航迹搜索算法^[9]。所以,A* 航迹搜索算法同时具备 Dijkstra 搜索算法与 BFS 算法的特点,既可以按照最短路径进行搜索,同时又能在搜索过程中添加启发函数和代价函数,使得航迹按照任务进行规划。A* 航迹规划算法的代价函数如下所示

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (7)$$

其中, n 代表当前待搜索节点; $g(n)$ 代表从航迹初始点到当前待搜索节点的实际代价; $h(n)$ 代表对从当前待搜索节点到航迹规划目标点的实际代价的估计值,又被称为启发函数^[6]。这样, $f(n)$ 就可以代表从航迹规划初始点经过点 n 到达目标点的最小代价估计值^[10-11],上述代价一般指路径长度,

可使用欧氏距离或者曼哈顿距离进行计算。

利用 A* 搜索算法进行三维航迹规划之前,需要将空间三维网格化,利用网格点完成航迹规划。在相邻 $3 \times 3 \times 3$ 共 27 个三维网格点中,除去当前节点 n ,可对剩余 26 个网格点进行搜索。在使用 A* 搜索算法进行航迹规划时,需要建立 2 个数据表:Open 表和 Close 表,Open 表用于储存还未进行搜索的节点,Close 表用于储存已经完成搜索的节点^[12-15]。

2.2 改进 A* 搜索算法代价函数设计

冰下航迹规划需要从地形与海冰避障约束、航程约束、定深巡航约束以及能量约束 4 个方面展开。传统的代价函数很难适应该任务需求,所以本文将 A* 航迹规划算法的代价函数进行了如下修改

$$f(n) = \alpha g(n) + \beta h_1(n) + \mu h_2(n) + \gamma h_3(n) \quad (8)$$

其中, $g(n)$ 代表从航迹初始点到当前待搜索节点的距离约束代价; $h_1(n)$ 代表对从当前待搜索节点到航迹规划目标点的距离约束代价的估计值; $h_2(n)$ 代表对从当前待搜索节点到航迹规划目标点的地形约束代价的估计值; $h_3(n)$ 代表对从当前待搜索节点到航迹规划目标点的定深巡航约束代价的估计值。 $\alpha, \beta, \mu, \gamma$ 为各项的权值系数,且满足 $\alpha, \beta, \mu, \gamma \geq 0$ 。

1) 航程约束代价设计

航程约束代价主要分为两部分:从航迹初始点到当前待搜索节点的欧氏距离 $g(n)$ 与当前待搜索节点到终点的曼哈顿距离 $h_1(n)$ 。

2) 地形与海冰避障约束代价设计

在实际航行过程中,当 UUV 距离障碍物较近时,危险程度会随着与地形(海冰)距离的缩短而逐渐增大;而当 UUV 距离地形(海冰)较远时,UUV 则处于安全状态(图 1)。可依据 UUV 航行时距地形与海冰的垂直安全距离 $\epsilon_{\text{obs}}, \epsilon_{\text{ice}}$ 和实际垂直距离 $x_{\text{obs}}, x_{\text{ice}}$ 对地形与海冰避障约束代价进行定义

$$h_2(n) = h_{\text{obs}}(n) + h_{\text{ice}}(n) \quad (9)$$

其中, $h_{\text{obs}}(n)$ 为地形避障约束代价; $h_{\text{ice}}(n)$ 为海冰避障约束代价,它们的表达式分别为

$$h_{\text{obs}}(n) = \begin{cases} \exp[k_{\text{obs}}(\epsilon_{\text{obs}} - x_{\text{obs}})], & \text{If } \epsilon_{\text{obs}} > x_{\text{obs}} \\ 0, & \text{Else} \end{cases} \quad (10)$$

$$h_{\text{ice}}(n) = \begin{cases} \exp[k_{\text{ice}}(\epsilon_{\text{ice}} - x_{\text{ice}})], & \text{If } \epsilon_{\text{ice}} > x_{\text{ice}} \\ 0, & \text{Eles} \end{cases} \quad (11)$$

式中, k_{obs} 与 k_{ice} 分别为地形避障约束代价与海冰避障约束代价的调整参数。

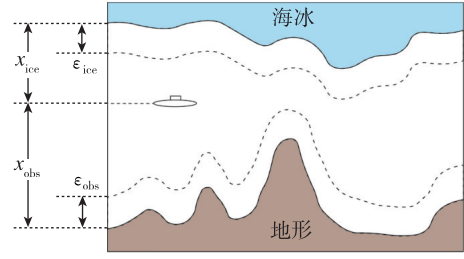


图 1 UUV 水下航行剖面图

Fig. 1 UUV underwater navigation profile

3) 定深巡航约束代价设计

当 UUV 在执行任务时,会有定深巡航高度的要求,在任务允许的范围内,调整 UUV 航行深度不会增加定深巡航代价;当 UUV 航行深度超出允许范围时,定深巡航高度约束代价会快速增加,可定义定深巡航高度约束代价为

$$h_3(n) = \begin{cases} \exp(k_h |h - h_{\text{task}}|), & \text{If } |h - h_{\text{task}}| > h_e \\ 0, & \text{Eles} \end{cases} \quad (12)$$

式中, k_h 为定深巡航约束代价的调整参数。

4) 能量约束代价设计

当 UUV 在能量耗尽之前完成任务可不受到约束的影响;当 UUV 未能在能量耗尽之前完成任务,则判定航迹规划失败。

经过前期仿真验证可得:当 $\alpha = \beta = 1, \gamma = 1, \mu \leq 0.035$ 时,规划出的航迹会不受距离约束代价的约束;当 $\alpha = \beta = 1, \mu = 1, \gamma \geq 62$ 时,规划出的航迹会不受距离约束代价与地形约束代价的约束。综上所述,可得本文的权值系数取值范围为:当 $\alpha = \beta = 1$ 时,需满足如下不等式

$$\begin{cases} \mu \geq 0.035 \\ 0 \leq \gamma \leq 62 \end{cases} \quad (13)$$

3 仿真实验

以 UUV 穿越某一覆盖有海冰的复杂地形这一情形为例,进行多次仿真验证。地形范围为 $100\text{km} \times 100\text{km}$, 格网精度为 $(1\text{km}, 1\text{km}, 1\text{m})$, 仿真步长为 $r = 1$ 。

任务 1: UUV 要安全穿越某一被海冰完全覆盖的复杂地形,任务要求 UUV 在深度 -60m 保持定深航行,且要完成避障。航迹规划的起点为 $(5\text{km}, 5\text{km}, -60\text{m})$, 航迹规划的终点为 $(95\text{km}, 95\text{km}, -60\text{m})$ 。设定定深巡航高度 $h_{\text{task}} = -60\text{m}$, 可接受巡航深度最大偏差 $h_e = 0$, 地形安全距离 $\epsilon_{\text{obs}} = 5\text{m}$,

海冰安全距离 $\epsilon_{ice} = 10\text{m}$, 仿真中各项权值系数 $\alpha = 1, \beta = 1, \mu = 3, \gamma = 2$ 。UUV 既需要保证航行安全, 又需要完成定深航行任务, 所以地形(海冰)避障约束权值系数与定深巡航高度约束权值系数需取较大值, 并且前者大于后者。仿真结果如图 2~图 5 所示。

从图 2 与图 3 的航迹三维图可以看出, UUV 具有较好的地形回避能力, 且可以顺利完成从起点至终点的航迹规划, 航迹总长度为 142.65km。从

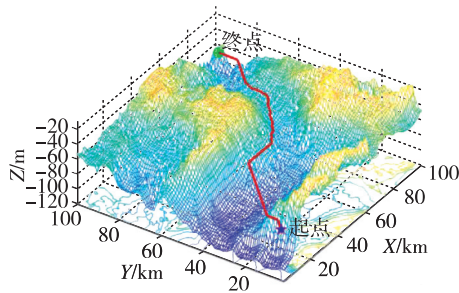


图 2 任务 1 地形高度及三维航迹

Fig. 2 Terrain height and 3D track of task 1

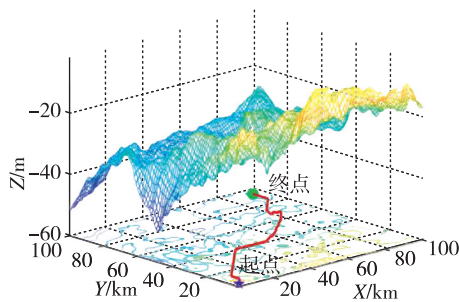


图 3 任务 1 冰层下表面高度及三维航迹

Fig. 3 The height of the lower surface of the ice layer and its 3D track of task 1

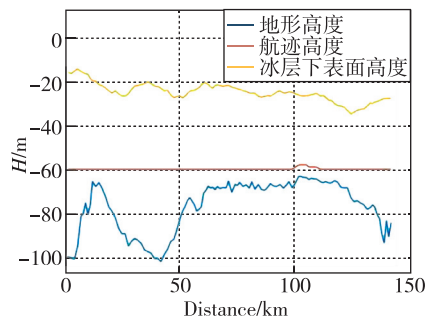


图 4 任务 1 航迹高度及地形与冰层下表面高度

Fig. 4 Track height, terrain and ice surface height of task 1

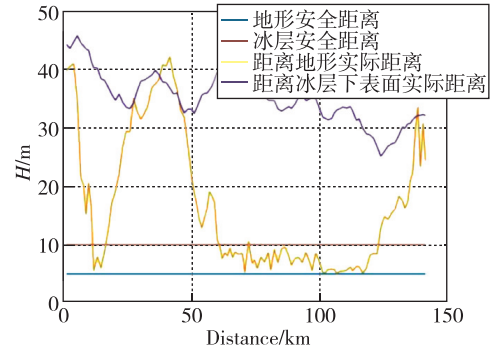


图 5 任务 1 航迹上安全距离与实际距离

Fig. 5 Safe distance and actual distance on track of task 1

图 4 与图 5 的航迹高度示意图与安全距离示意图可以看出, UUV 在整个航迹规划过程中, 航迹大部分时间处于设定的航行高度 $h_{task} = -60\text{m}$ 且基本保持高度稳定, 距离地形的实际距离始终大于或者等于设定的地形安全距离, 符合任务需求。

任务 2: UUV 要安全穿越某一被海冰覆盖的复杂地形, 任务要求 UUV 在整个航行过程中需要完成避障, 并且尽可能缩短航程。航迹规划的起点为 $(5\text{km}, 5\text{km}, -40\text{m})$, 航迹规划的终点为 $(95\text{km}, 95\text{km}, -40\text{m})$ 。设定定深巡航高度 $h_{task} = -40\text{m}$, 可接受巡航深度最大偏差 $h_e = 10\text{m}$, 地形安全距离 $\epsilon_{obs} = 15\text{m}$, 海冰安全距离 $\epsilon_{ice} = 10\text{m}$, 各项的权值系数 $\alpha = 2, \beta = 2, \mu = 3, \gamma = 1$ 。UUV 既需要保证航行安全且完成避障, 又需要缩短航程, 所以初始点到当前待搜索节点的距离约束权值系数、当前待搜索节点到航迹规划目标点的距离约束权值系数与地形(海冰)避障约束权值系数需要取较大值, 并且后者大于前两者。仿真结果如图 6~图 9 所示。

从图 6 与图 7 的航迹三维图可以看出, UUV 具有良好的地形回避能力, 可以顺利完成从起点至终点的航迹规划, 且规划出的航迹较为平直, 航迹总长度为 135.72km。从图 8 与图 9 的航迹高度示

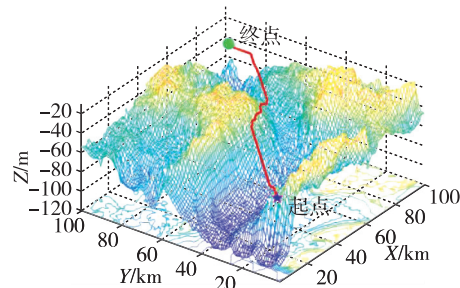


图 6 任务 2 地形高度及三维航迹

Fig. 6 Terrain height and 3D track of task 2

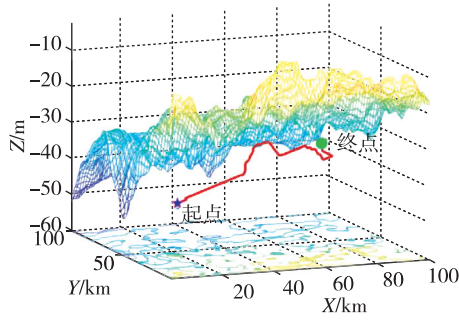


图 7 任务 2 冰层下表面高度及三维航迹

Fig. 7 The height of the lower surface of the ice layer and its 3D track of task 2

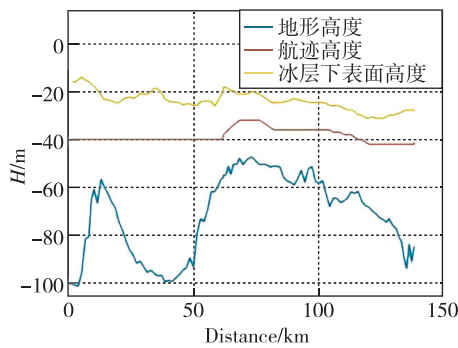


图 8 任务 2 航迹高度及地形与冰层下表面高度

Fig. 8 Track height, terrain and ice surface height of task 2

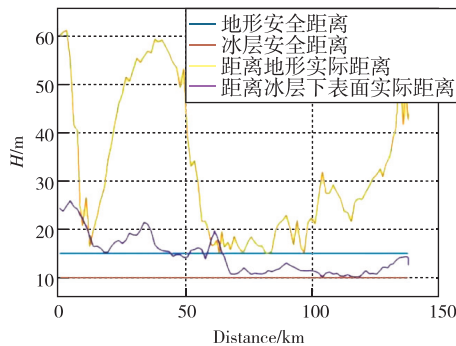


图 9 任务 2 航迹上安全距离与实际距离

Fig. 9 Safe distance and actual distance on track of task 2

意图与安全距离示意图可以看出, UUV 在整个航迹规划过程中, 由于定深巡航约束代价取值较小, 所以初始设定的航行高度 $h_{\text{task}} = -40\text{m}$ 对航迹规划约束不强。规划的航迹距离地形的实际距离始终大于或者等于设定的地形安全距离, 相较于任务 1, 航程缩短, 符合任务需求。

4 结论

本文针对冰下避障航迹规划问题, 结合传统人工势场航迹规划算法的思想, 设计了一种基于改进

A* 算法的 UUV 冰下避障航迹规划算法, 充分考虑了海冰避障约束、地形避障约束、定深巡航高度约束以及能量约束, 设计了针对上述约束的代价函数, 将代价函数与 A* 航迹搜索算法结合获得改进 A* 航迹搜索算法, 并完成了三维航迹仿真。

通过仿真验证了该算法规划的路径能够有效完成地形与海冰避障、航行深度控制以及航行距离控制。通过调整代价函数的权值系数, 仿真所得航迹能够契合任务要求。

本文仿真只是在已知的环境下进行的, 而 UUV 实际航行时的环境是动态变化的, 针对动态变化环境的航迹规划是下一步工作的重点。

参考文献

- [1] 黄加强. 北极航行对潜艇航行性能影响研究[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(9): 62-66.
Huang Jiaqiang. Research on the influence of Arctic navigation on the navigation performance of submarine[J]. Ship Electronic Engineering, 2020, 40(9): 62-66 (in Chinese).
- [2] Wang Y, Wang L, Chen G, et al. An improved ant colony optimization algorithm to the periodic vehicle routing problem with time window and service choice [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2020, 55: 100675.
- [3] Al-Zaydi Z, Al-Jamali N, Ismail K S. A modified genetic algorithm path planning for intelligent autonomous mobile robot [J]. Inventi Rapid Algorithm, 2012.
- [4] Aviation- Unmanned Aircraft; Recent findings from Beihang University has provided new information about unmanned aircraft (A real-time collision avoidance strategy in dynamic airspace based on dynamic artificial potential field algorithm) [J]. Defense & Aerospace Week, 2020.
- [5] Panda M, Das B, Subudhi B, et al. A comprehensive review of path planning algorithms for autonomous underwater vehicles [J]. International Journal of Automation and Computing, 2020, 17(3): 321-352.
- [6] 严浙平, 赵玉飞, 陈涛. 多约束条件下 UUV 空间航迹规划 [J]. 鱼雷技术, 2011, 19(5): 365-369 + 375.
Yan Zheping, Zhao Yufei, Chen Tao. Three-dimensional path planning for UUV with multiple constraints [J]. Torpedo Technology, 2011, 19(5): 365-369 + 375 (in Chinese).
- [7] 郭银景, 孟庆良, 孔芳, 等. AUV 路径规划算法研究

- 现状与展望[J]. 计算机科学与探索, 2020, 14(12): 1981-1994.
- Guo Yinjing, Meng Qingliang, Kong Fang, et al. Research status and prospect of AUV path planning algorithm[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2020, 14(12): 1981-1994(in Chinese).
- [8] 欧林渠. 高速船的航向航速控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- Ou Linqu. The control in the course and high speed ship[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016(in Chinese).
- [9] 毕小顺. 立体空间 A* 算法在寻找商场室内导航最优路径中的应用[J]. 无线互联科技, 2016(17): 147-148.
- Bi Xiaoshun. Application of three-dimensional space A* algorithm for finding the optimal path in shopping mall indoor navigation[J]. Wireless Internet Technology, 2016(17): 147-148(in Chinese).
- [10] 张健, 钟麟, 陈恒, 等. 基于实时飞行仿真的无人机任务规划系统设计[J]. 数学的实践与认识, 2017, 47(23): 197-204.
- Zhang Jian, Zhong Lin, Chen Heng, et al. Design of UAV mission planning system based on real-time fly simulation[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2017, 47(23): 197-204(in Chinese).
- [11] 李琼琼, 施杨洋, 布升强, 等. 基于改进 A* 算法的无人车路径规划研究[J]. 林业机械与木工设备, 2020, 48(6): 45-49.
- Li Qiongqiong, Shi Yangyang, Bu Shengqiang, et al. Research on unmanned vehicle path planning based on improved A* algorithm[J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2020, 48(6): 45-49(in Chinese).
- [12] Liu X, Zhang D, Zhang T, et al. Novel best path selection approach based on hybrid improved A* algorithm and reinforcement learning[J]. Applied Intelligence, 2021(prepublish).
- [13] Kong X, Pan B, Cherkashin E, et al. Multi-constraint UAV fast path planning based on improved A* algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1624(4): 042009.
- [14] Qahtan A, Emad A. Path-planning dynamic 3D space using modified A* algorithm[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 928(3): 032016.
- [15] 陶哲, 高跃飞, 郑天江, 等. 基于 A* 算法在蜂巢栅格地图中的路径规划研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 310-317.
- Tao Zhe, Gao Yuefei, Zheng Tianjiang, et al. Research on path planning in honeycomb grid map based on A* algorithm[J]. Journal of North China University (Natural Science Edition), 2020, 41(4): 310-317(in Chinese).

(编辑: 孟彬)