

融合人工势场灰狼算法的移动机器人路径规划^{*}

韩文旭 章翔峰 姜宏 焦文博 高博

(新疆大学智能制造现代产业学院(机械工程学院) 乌鲁木齐 830017)

摘要: 为解决灰狼算法在进行路径规划过程中存在的易陷入局部极值导致的搜索不到最优路径的情况,本文提出一种融合人工势场的改进灰狼算法。首先,通过非线性策略对收敛因子进行改进,保证搜索过程中种群的多样性;其次,改进灰狼位置更新策略,结合天牛须更新方法,增大算法的搜索范围;最后,融合灰狼算法和人工势场,提升算法搜索效率以及路径的安全性。并通过在3种不同的栅格地图环境中进行仿真实验,实验结果表明,改进灰狼算法能在保证路径长度较短的同时减少机器人的转向次数。

关键词: 灰狼算法;人工势场;路径规划;移动机器人

中图分类号: TP242; TN01 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4

Path planning of mobile robots using grey wolf algorithm with artificial potential field fusion

Han Wenxu Zhang Xiangfeng Jiang Hong Jiao Wenbo Gao Bo

(School of Intelligent Manufacturing and Modern Industry(School of Mechanical Engineering),
Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: In order to solve the situation that the gray wolf algorithm is easy to fall into the local extreme value during the path planning process, this paper proposes an improved gray wolf algorithm incorporating the artificial potential field. Firstly, the convergence factor is improved by a nonlinear strategy to ensure the diversity of populations in the search process; secondly, the gray wolf position update strategy is improved by combining with the beetle antennae search strategy update method to improve the searching ability of the algorithm; finally, the gray wolf algorithm and artificial potential field are fused to improve the searching efficiency of the algorithm as well as the security of the paths. The experimental results show that the improved gray wolf algorithm reduces; the number of robot steering while ensuring a shorter path length.

Keywords: gray wolf algorithm; artificial potential field; path planning; mobile robots

0 引言

移动机器人路径规划问题是指通过指定相应的目标点,使得机器人能在复杂的障碍环境中自主的寻找到一条安全的最优路径^[1]。目前,在移动机器人在路径规划研究领域主要分为3类:传统路径规划方法,基于采样的路径规划方法以及基于智能算法的路径规划方法。其中传统的路径规划方法主要包括:A*算法^[2]、动态窗口法(dynamic window approaches, DWA)^[3]、人工势场法(artificial potential field, APF)^[4]等;基于采样的路径规划方法包含:概率路图法(probabilistic roadmap method, PRM)^[5],快速随机树算法(rapidly-exploring random trees, RRT)^[6];基

于智能算法的路径规划方法包括:灰狼算法(grey wolf optimization, GWO)^[7]、遗传算法(genetic algorithm, GA)^[8]、哈里斯鹰优化算法(harris hawk optimization, HHO)^[9]等。

灰狼算法是一种新型的启发式搜索算法,具有搜索速度快,调节参数少等优点,被广泛应用于故障诊断,数字孪生,路径规划等方面,但是其在机器人路径规划过程中仍然存在一些不足,包括易发生搜索停滞,易陷入局部最优解等。因此刘云平等^[10]针对实际搜索过程中非线性变化特点,利用收敛因子非线性调整和powell算法与灰狼算法结合,解决灰狼算法后期局部最优的问题;刘志强等^[11]在解决移动机器人全局路径规划问题上通过使用tent混沌映

射初始化种群策略以及融合适应度和动态权重因子等方法对灰狼算法进行改进,提高算法全局遍历能力和防止局部停滞;张朋超等^[12]针对矿山复杂地形环境下无人矿车运输方面路径规划问题,建立速度-坡度的变速度模型并利用正余弦变换收敛因子和交叉扰动策略,扩大搜索范围,提高路径规划效率;孙凌宇等^[13]在难以克服路径次优和收敛较慢的问题通过引入跳点搜索、夹角启发信息和步长启发信息对传统蚁群算法进行改进,提高路径光滑性和环境适应能力;游达章等^[14]融合非线性收敛因子、遗传算法中的交叉变异策略以及模拟退火策略以改进灰狼算法,一定程度上解决算法陷入局部最优问题并缩减了路径长度、提高路径平滑度;马小康等^[15]针对救援机器人路径规划问题为提升路径规划的效率,提出一种双层路径规划算法,使用灰狼算法和人工势场法相结合,对路径角度进行约束提高了搜索效率。

通过上述学者研究单一改进策略一般不能满足克服局部最优、平衡局部与全局搜索能力、提高平滑度以及提高局部搜索的精度等方面问题,但随着社会的发展,对路径规划的各个方面要求均需要不断提高,故为提升灰狼算法在路径规划问题中的寻优能力,本文首先在传统灰狼优化算法的基础上,引入非线性策略进行收敛因子的调整,增加了种群的多样性;其次通过引入天牛须更新方法,拓展算法的更新搜索范围,防止算法发生停滞并将人工势场法和灰狼算法进行融合,缩短了路径长度。最后,通过在栅格地图上与其他算法进行路径规划对比实验,验证了改进算法在路径规划问题上的可行性与有效性。

1 灰狼优化算法

1.1 灰狼优化算法数学模型

灰狼优化算法是通过模拟灰狼的捕食过程进行求解最优解的一种元启发式算法^[16]。灰狼的社会结构分别由以下4个层级构成: α 狼、 β 狼、 δ 狼、 ω 狼,如图1所示。其中, α 狼为整个狼群的领导者,对应求解问题中的最优解。

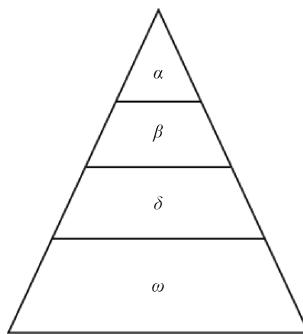


图1 灰狼社会层级

Fig. 1 Social hierarchy of grey wolves

灰狼的捕食过程的数学模型可以表示为:

$$D = |CX_p(t) - X(t)| \quad (1)$$

$$D = |CX_p(t) - X(t)| \quad (2)$$

式中: $X(t+1)$ 为灰狼下一时刻的位置, $X_p(t)$ 为当前时刻猎物的位置, C 和 A 为系数,其计算公式为:

$$A = 2ar_1 - a \quad (3)$$

$$C = 2r_2 \quad (4)$$

式中: a 为收敛因子,其值与迭代次数呈负相关, r_1, r_2 为 0~1 的随机数^[17]。 a 的计算公式为:

$$a = 2 - 2 \frac{N_{iter}}{N_{max}} \quad (5)$$

式中: N_{iter} 为当前迭代次数, N_{max} 为最大迭代次数。

$$X_1 = X_\alpha - A_1 \cdot D_\alpha \quad (6)$$

$$X_2 = X_\beta - A_2 \cdot D_\beta \quad (7)$$

$$X_3 = X_\delta - A_3 \cdot D_\delta \quad (8)$$

式(6)~(8)表示 α 狼、 β 狼、 δ 狼的更新过程, X_1, X_2, X_3 表示 α 狼、 β 狼和 δ 狼在下一时刻的位置。

1.2 改进灰狼优化算法

1) 收敛因子优化

灰狼优化算法在进行优化问题求解时,需要根据参数 a 对狼群的捕食半径进行调整,而线性的调整收敛因子会导致算法的种群多样性降低,对搜索的结果影响较大。因此本文采用非线性策略进行收敛因子 a 的更新,更新公式如式(9)所示。

$$a = 2 \left(1 - \frac{N_{iter}}{N_{max}} \right)^{k_2 \frac{N_{iter}}{N_{max}}} \quad (9)$$

式中: k_2 为常量,当 $k_2 = 1.2$ 时,算法搜索性能最佳。

由图2可知,优化后的收敛因子在迭代早期下降较慢,可以使算法在前期具有更好的搜索能力。在迭代后期收敛因子缓慢接近为0,可以保证算法的稳定性。

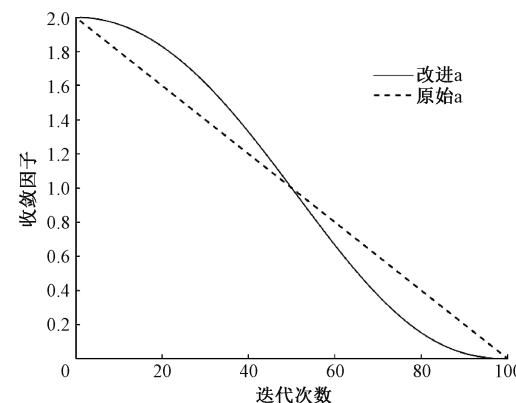


图2 收敛因子比较

Fig. 2 Comparison of convergence factors

2) 位置更新改进

在原始的灰狼算法中,由于在搜索过程中,灰狼会逐渐靠近搜索的最优解,而忽略其余方向上的求解,导致出现局部最优情况的发生。为此本文提出引入天牛须搜索策略增加算法的种群多样性,避免算法搜索出现停滞^[18]。

考虑对3个头狼的搜索方向进行扩展,在灰狼算法中

系数 A 决定狼群捕食的方向与步长, 因此本文对 α 狼、 β 狼、 δ 狼的更新方式改进如下:

$$\begin{cases} X_{i,R} = X - A_i \cdot D \\ X_{i,L} = X + A_i \cdot D \end{cases} \quad (10)$$

$$X_i = X - A_i D \cdot \text{sign}(fit(X_{i,R}) - fit(X_{i,L})) \quad (11)$$

式中: $X_{i,R}$ 和 $X_{i,L}$ 为更新后左右两侧的头狼位置, $\text{sign}(\cdot)$ 为 sign 函数, $fit(\cdot)$ 为适应度函数。

3) 适应度函数优化

为了在地图中规划出最优路径, 本文在可行路径的适应度函数中加入转向惩罚函数, 具体的适应度函数定义如下:

$$fit(X) = S + S_\theta \quad (12)$$

式中: S 为所规划的路径长度, γ 为比例参数, 用以平衡势场力和路径长度的适应度, 其设置为 0.01, θ 为转向惩罚函数, 具体表达式如下:

$$S_\theta = \begin{cases} 1, & 0 \leq |\theta| \leq 45 \\ 0.5, & 45 < |\theta| \leq 90 \\ 0.05, & 90 < |\theta| < 180 \end{cases} \quad (13)$$

2 人工势场

人工势场基本思想是将机器人的运动看成是目标位置对机器人的引力和周围环境对机器人的斥力共同作用的结果^[19]。通过这两种力的合力作用机器人便可以在不与障碍物发生碰撞的情况下安全抵达目标位置。

2.1 引力势场

若当前时刻机器人的位置为 $p = (x, y)$, 目标点位置为 $p_{goal} = (x_{goal}, y_{goal})$, 则引力势场函数可以表示为:

$$\|U_{att}\| = \frac{1}{2} K_a d^2(p, p_{goal}) \quad (14)$$

式中: K_a 为引力势场系数; $d(p, p_{goal})$ 为当前机器人位置与目标位置之间的距离。则机器人在当前位置所受引力的可表示为:

$$F_{att} = K_a d(p_{goal} - p) \quad (15)$$

式(15)表明机器人所受的引力势能与机器人和目标点之间的距离正相关。

2.2 斥力势场

斥力势场函数表示如下:

$$\|U_{rep}\| = \begin{cases} \frac{1}{2} K_r \left(\frac{1}{d_{po}} - \frac{1}{d^*} \right)^2, & \\ 0, & \end{cases} \quad (16)$$

式中: K_r 为斥力势场系数; d^* 为障碍物斥力作用范围; d_{po} 为障碍物与机器人之间的距离; 则机器人在当前位置所受的斥力表示如下:

$$F_{rep} = \begin{cases} K_r \left(\frac{1}{d_{po}} - \frac{1}{d^*} \right) \frac{1}{d_{po}^2}, & d_{po} \leq d^* \\ 0, & d_{po} > d^* \end{cases} \quad (17)$$

由式(17)可得, 当障碍物与机器人之间的距离大于障

碍物的作用范围时不会对机器人的运动产生作用^[20]。本文中设置 K_r 和 K_a 分别为 5 和 1。

2.3 融合灰狼算法与人工势场法

同时为提升算法的寻优能力, 在灰狼算法的基础上融合人工势场, 通过在灰狼算法路径节点的基础上利用人工势场进行局部路径规划, 可以保证在路径最短的情况下提升路径的安全性与可靠性。具体流程如图 3 所示。

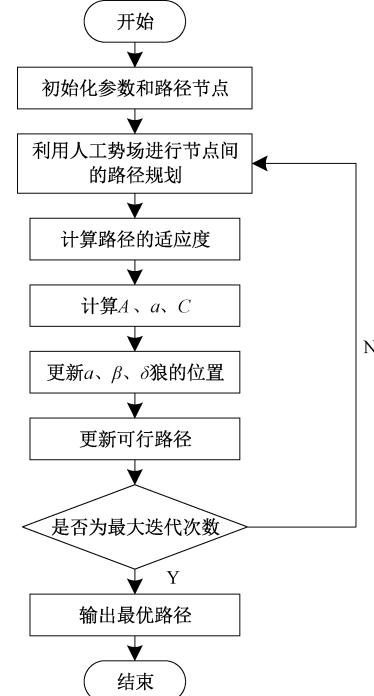


图 3 算法流程

Fig. 3 Algorithm flow

3 仿真结果与分析

为验证改进后算法的性能, 本文在建立的栅格地图环境中进行仿真验证, 实验建立的栅格地图如图 4 所示。

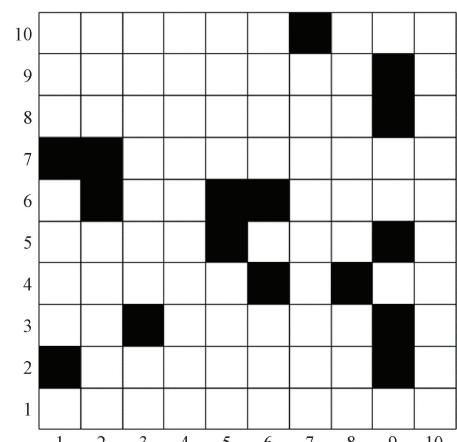


图 4 栅格地图

Fig. 4 Grid map

图4为 10×10 的栅格地图,黑色部分为障碍物,白色区域为机器人可通行区域。实验中设置的种群个数为30,最大迭代次数为500,收敛因子的初始值为2。

在实验中设置起始点为(0,0),终止点为(10,10)。在3种不同大小的地图上分别采用原始灰狼算法(GWO),人工势场法(APF)、遗传算法(GA)、黑猩猩算法(chimp optimization algorithm, CHOA)、麻雀算法(sparrow search algorithm, SSA)以及改进灰狼算法(improved grey wolf optimization, IGWO)进行对比验证。

图5和图6为4种不同算法在 10×10 的栅格地图环境下路径规划的结果和算法的迭代曲线。从图5中可以看出GA和APF、SSA算法穿过了障碍物的交点,规划出的路径不符合实际,CHOA算法转弯次数较多而相对于GWO,IGWO规划的路径更短,并且该改进算法搜索效率较高,在迭代初期就已搜寻到最优路径。

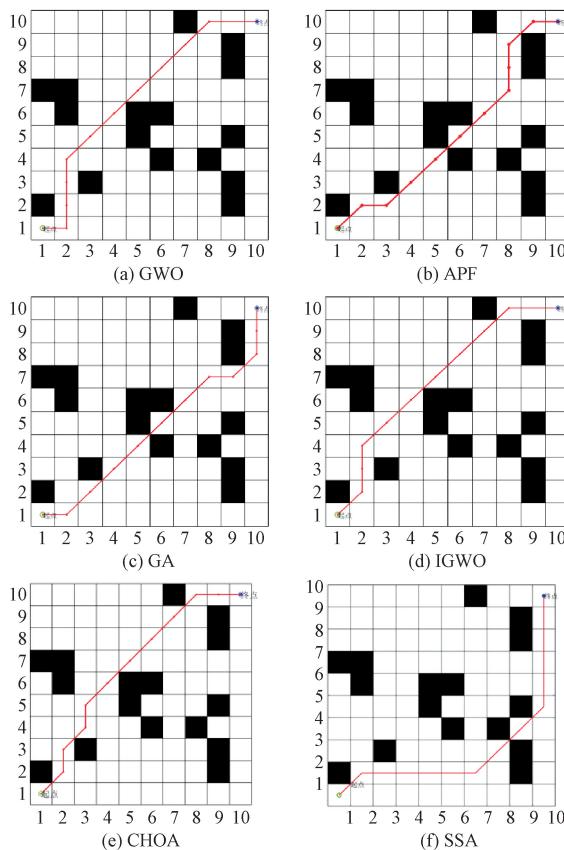


图5 10×10 地图下路径规划的结果

Fig. 5 Results of path planning on a 10×10 map

由表1可知,在 10×10 的栅格地图环境中,SSA算法与CHOA算法规划出的路径较长,而IGWO与APF、GA算法规划出的路径在长度上相同都为13.90。但是IGWO路径转弯次数较少,整条路径只需3次转向,更加符合实际应用需求。

为保证算法的适用性以及验证改进算法在更加复杂环

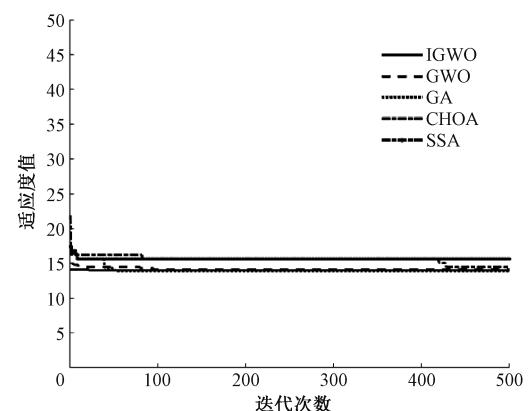


图6 10×10 地图下算法迭代曲线

Fig. 6 Algorithm iteration curve on a 10×10 map

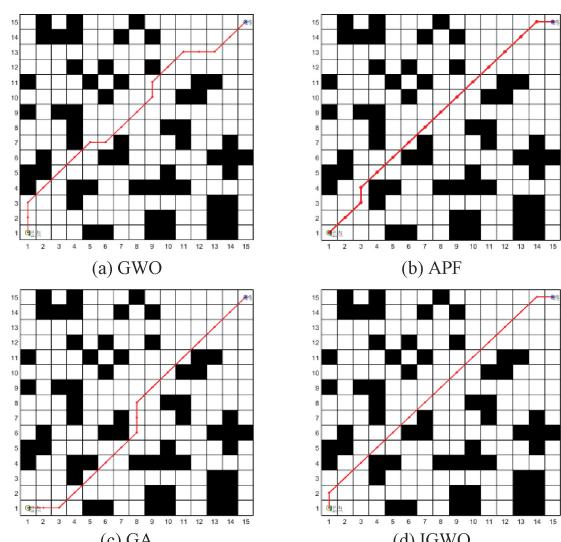
表1 10×10 地图下路径规划性能对比

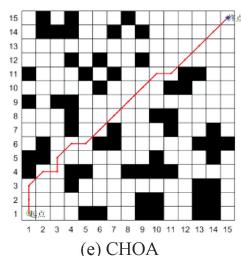
Table 1 Performance comparison of path planning

算法	路径长度	转弯次数
GWO	14.49	3
APF	13.90	5
GA	13.90	4
CHOA	14.14	5
SSA	15.66	3
IGWO	13.90	3

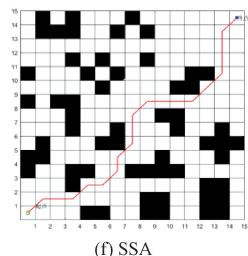
境中的表现,在 15×15 和 20×20 的环境中进行仿真实验验证。移动机器人的起始位置和终止位置分别为(1,1)和(15,15)、(20,20)。图7和图8分别为6种算法在 15×15 的环境下路径规划的结果与迭代曲线。表2为 15×15 栅格地图环境下6种算法的性能对比。

由表2可知,IGWO算法规划出的路径长度为20.38,转弯角度为2次,相对于其他对比种算法能在较短路径条件下,减少路径的转向次数。





(e) CHOA



(f) SSA

图 7 15×15 地图下路径规划的结果

Fig. 7 Path planning results on a 15×15 map

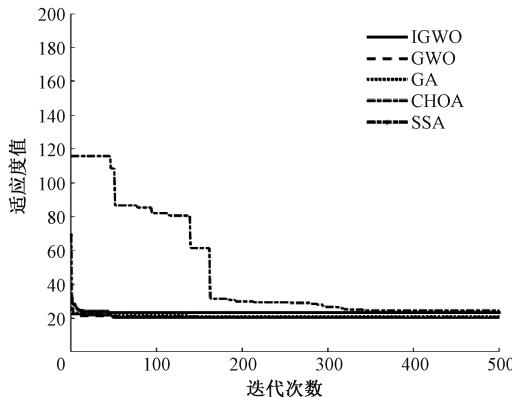


图 8 15×15 地图下算法迭代曲线

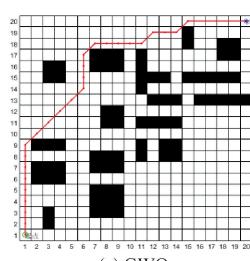
Fig. 8 Algorithm iteration curve on a 15×15 map

表 2 15×15 地图下路径规划性能对比

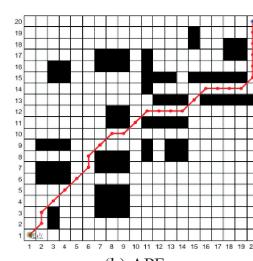
Table 2 Performance comparison of path planning on 15×15 map

算法	路径长度	转弯次数
GWO	21.55	7
APF	20.38	3
GA	20.97	3
CHOA	22.41	8
SSA	23.32	12
IGWO	20.38	2

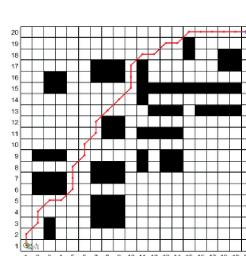
图 9 和图 10 分别为 20×20 地图下 6 种算法路径规划结果及其迭代曲线,根据图 9 和图 10 可知,IGWO 算法在迭代初期适应度较高,表明算法迭代初期种群具有多样性,保证算法在迭代过程中不至于陷入局部最优,而迭代后期适应度值逐渐降低,表明算法收敛精度较高。同时由表 3



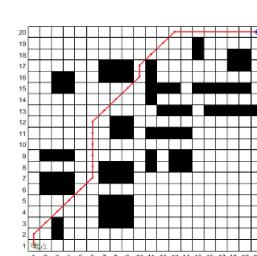
(a) GWO



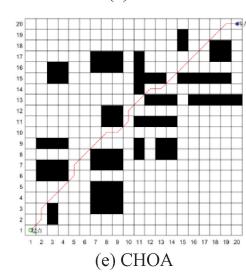
(b) APF



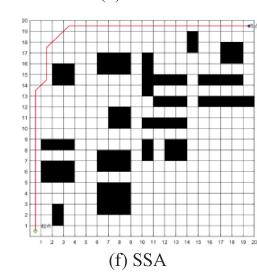
(c) GA



(d) IGWO



(e) CHOA



(f) SSA

图 9 20×20 地图下路径规划的结果

Fig. 9 Results of path planning on a 20×20 map

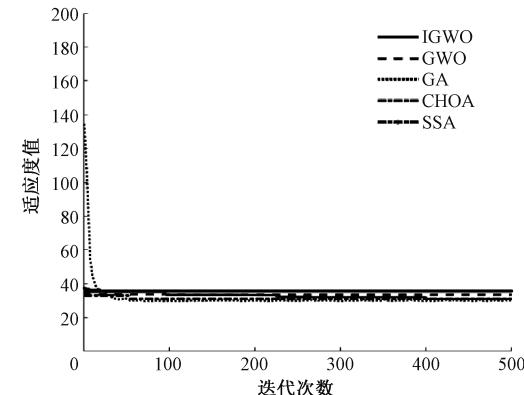


图 10 20×20 地图下算法迭代曲线

Fig. 10 Algorithm iteration curve on a 20×20 map

可知,改进后的算法规划的路径相对于其他对比算法具有长度短,并且转向次数少的特点,表明本文所提的改进算法能有效的搜寻最优路径。

表 3 20×20 地图下路径规划性能对比

Table 3 Performance comparison of path planning on 20×20 map

算法	路径长度	转弯次数
GWO	33.31	8
APF	30.96	11
GA	31.55	17
CHOA	31.18	10
SSA	35.66	4
IGWO	30.96	6

4 结 论

本文提出了一种结合人工势场法的改进灰狼算法,针对灰狼算法在路径规划过程中易陷入局部极值的问题,提出采用非线性策略对收敛因子进行优化,提升种群的多样性,防止算法过早收敛,陷入局部极值;采用牛顿法扩张灰狼算法的搜索区域,避免算法在搜索过程中发生停滞;融合人工势场法,通过在路径节点间中采用人工势场法进行规划,提升了算法的搜索效率和规划精度。本文基于3种不同的栅格地图环境下进行测试以验证优化算法的性能。结果表明,优化后的算法能在保证路径安全的情况下,搜寻出最短且转弯次数最少的路径,突出本文所提算法的优异性与可靠性,并在下个阶段重点聚焦复杂动态环境下的路径规划问题。

参考文献

- [1] 时维国,宁宁,宋存利,等.基于蚁群算法与人工势场法的移动机器人路径规划[J].农业机械学报,2023,54(12): 407-416.
- SHI W G, NING N, SONG C L, et al. Path planning of mobile robots based on ant colony algorithm and artificial potential field algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12):407-416.
- [2] ZHANG D X, CHEN C, ZHANG G Y. AGV path planning based on improved A-star algorithm[C]. 2024 IEEE 7th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference(IAEAC), IEEE, 2024, 7: 1590-1595.
- [3] WU B, CHI X N, ZHAO C C, et al. Dynamic path planning for forklift AGV based on smoothing A* and improved DWA hybrid algorithm[J]. Sensors, 2022, 22(18): 7079.
- [4] CHEN Y L, BAI G Q, ZHAN Y, et al. Path planning and obstacle avoiding of the USV based on improved ACO-APF hybrid algorithm with adaptive early-warning[J]. IEEE Access, 2021, 9: 40728-40742.
- [5] ALARABI S, LUO C M, SANTORA M. A PRM approach to path planning with obstacle avoidance of an autonomous robot[C]. 2022 8th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA), IEEE, 2022: 76-80.
- [6] CONNELL D, LA H M. Dynamic path planning and replanning for mobile robots using RRT [C]. 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics(SMC), IEEE, 2017: 1429-1434.
- [7] CHEN Y Q, YU Q Z, HAN D, et al. UAV path planning: Integration of grey wolf algorithm and artificial potential field [J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2024, 36(15), DOI:10.1002/cpe.8120.
- [8] 刘志海,高龙,韩文钰,等.基于改进遗传算法的移动机器人路径规划研究[J].制造业自动化,2024,46(5): 26-30.
- LIU ZH H, GAO L, HAN W Y, et al. Research on mobile robot path planning based on improved genetic algorithm [J]. Manufacturing Automation, 2024, 46(5):26-30.
- [9] 胡啸,张呈越,卞炜,等.基于改进哈里斯鹰优化算法的动态路径规划研究[J].控制工程,2024,31(4): 591-600.
- HU X, ZHANG CH Y, BIAN W, et al. Research on dynamic path planning based on improved harris hawk algorithm[J]. Control Engineering of China, 2024, 31(4): 591-600.
- [10] 刘云平,朱慧如,方卫华.改进灰狼算法的无人机路径规划[J].电光与控制,2023,30(7):1-7.
- LIU Y P, ZHU H R, FANG W H. Path planning of UAV based on improved grey wolf optimizer algorithm [J]. Electronics Optics & Control, 2023,30(7):1-7.
- [11] 刘志强,何丽,袁亮,等.采用改进灰狼算法的移动机器人路径规划[J].西安交通大学学报,2022,56(10): 49-60.
- LIU ZH Q, HE L, YUAN L, et al. Path planning of mobile robot based on TGWO algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022,56(10):49-60.
- [12] 张朋超,刘翔,刘家模,等.基于改进灰狼算法的无人矿车路径规划[J].矿业研究与开发,2024,44(5): 194-200.
- ZHANG P CH, LIU X, LIU J B, et al. Path Planning of unmanned mine truck based on improved grey wolf algorithm [J]. Mining Research and Development, 2024, 44(5):194-200.
- [13] 孙凌宇,王威,秦红亮,等.跳点优化蚁群算法的移动机器人路径规划[J].电子测量技术,2023,46(9): 48-53.
- SUN L Y, WANG W, QIN H L, et al. Mobile robot path planning based on jump point optimization ant colony algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(9): 48-53.
- [14] 游达章,马力,张业鹏,等.基于杂交退火灰狼算法的移动机器人路径规划[J].电子测量技术,2023,46(9): 54-60.
- YOU D ZH, MA L, ZHANG Y P, et al. Path planning of mobile robot based on hybrid annealing gray wolf algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(9): 54-60.

- [15] 马小康,白宗文,杨延宁,等.融合灰狼算法和人工势场法的搜救机器人路径规划研究[J].制造业自动化,2024,46(4):48-52.
MA X K, BAI Z W, YANG Y N, et al. Research on path planning for search and rescue robots by fusing grey wolf algorithm and artificial potential field method[J]. Manufacturing Automation, 2024, 46(4): 48-52.
- [16] 黄琦,陈海洋,刘妍,等.基于多策略融合灰狼算法的移动机器人路径规划[J].空军工程大学学报,2024,25(3):112-120.
HUANG Q, CHEN H Y, LIU Y, et al. A mobile robot path planning based on multi-strategy fusion gray wolf algorithm[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(3): 112-120.
- [17] 张威,张鑫中,王丛佼,等.改进灰狼算法的变电站巡检机器人路径规划[J].重庆理工大学学报(自然科学),2023,37(6):129-135.
ZHANG W, ZHANG X ZH, WANG C J, et al. Path planning of substation inspection robots based on an improved grey wolf optimizer [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(6): 129-135.
- [18] FAN Q S, HUANG H S, LI Y T, et al. Beetle antenna strategy based grey wolf optimization [J]. Expert Systems with Applications, 2021, 165: 113882.
- [19] 牛秦玉,李美凡,赵勇.改进人工势场法的 AGV 路径规划算法研究[J].机床与液压,2022,50(17):19-24.
NIU Q Y, LI M F, ZHAO Y. Research on improved artificial potential field method for AGV path planning[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(17): 19-24.
- [20] 马小陆,梅宏.基于改进势场蚁群算法的移动机器人全局路径规划[J].机械工程学报,2021,57(1):19-27.
MA X L, MEI H. Mobile robot global path planning based on improved ant colony system algorithm with potential field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(1): 19-27.

作者简介

韩文旭,硕士研究生,主要研究方向为主动嗅觉、移动机器人路径规划、泄漏源定位。

E-mail:han15288819717@163.com

章翔峰(通信作者),教授,博士生导师,主要研究方向为智能制造、移动机器人路径规划、故障诊断。

E-mail:15276606076@163.com

姜宏,教授,博士生导师,主要研究方向为智能控制、图像处理、移动机器人路径规划。

E-mail:onlyxjjh@xju.edu.cn

焦文博,硕士研究生,主要研究方向为智能控制、主动嗅觉。

E-mail:2240939978@qq.com

高博,硕士研究生,主要研究方向为智能控制、图像处理、路径规划。

E-mail:891162447@qq.com