

基于遗传-粒子群优化算法的 USV 路径规划方法

官月红,张少君,王明雨,孟雄飞

山东交通学院 航运学院,山东 威海 264209

摘要:为解决传统粒子群优化算法 (particle swarm optimization algorithm, PSO) 应用于无人水面舰艇 (unmanned surface vessel, USV) 路径规划时存在的早熟收敛问题,提出一种结合遗传思想的 PSO,在传统的 PSO 中引入遗传算法 (genetic algorithm, GA) 中的交叉、变异操作,避免算法进入局部最优解,对惯性权重进行自适应调整,加速算法收敛。采用 MATLAB 软件对 USV 巡检水域环境进行建模,应用改进的 PSO 进行路径规划。仿真结果表明:相对于传统的 PSO 和 GA,该算法有效减少路径交叉点,大幅缩短路径总长和算法收敛时间。

关键词:USV;路径规划;PSO;GA;交叉变异

中图分类号:U674

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2022)01-0029-06

引用格式:官月红,张少君,王明雨,等.基于遗传-粒子群优化算法的 USV 路径规划方法[J].山东交通学院学报,2022,30(1):29-34.

GONG Yuehong, ZHANG Shaojun, WANG Mingyu, et al. USV path planning method based on GA-PSO [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2022, 30(1): 29-34.

0 引言

随着国家海洋战略的实施,人们在开发海洋资源的同时,也更加重视对海洋环境的保护与治理。为了及时发现水域污染问题,尽早采取治理措施,应用计算机、通信、电子及自动控制等技术对水域进行监测。采用无人水面舰艇 (unmanned surface vessel, USV) 对水域环境进行监测,具有无人、智能化、速度快等优势。为保证 USV 完成对水域的采样巡检任务,根据已知的采样点信息,在 USV 出发前需要为其规划一条全局路径。采用群智能算法对机器人进行路径规划是目前自动控制领域研究的热点,常用的群智能算法包括蚁群算法、粒子群算法 (particle swarm optimization algorithm, PSO)、鱼群算法等^[1-3]。智能算法在机器人路径规划领域已有较多可参考的实例^[4-10],对 USV 路径规划算法的研究尚属前沿领域,可参考方案有限。文献[11]采用改进 PSO 规划水下航行器路径。文献[12-13]采用改进的 PSO 对移动机器人进行路径规划,通过动态调整惯性权重实现动态路径调整。文献[14]采用结合 PSO 改进的遗传算法 (genetic algorithm, GA) 对 USV 进行避障路径规划。USV 按照一定的顺序访问采样点的过程,可以等效为旅行商问题 (travelling salesman problem, TSP)。用于求解 TSP 问题的路径规划算法包括蚁群算法、PSO、GA 等^[15-18],其中 PSO 在全局路径规划中的应用比较广泛,但存在早熟收敛的问题。

为了提高寻优精度和收敛速度,本文提出一种遗传-粒子群混合算法,在传统 PSO 的基础上,引入 GA 中变异、交叉思想,同时按照算法迭代次数对惯性权重进行自适应调整,避免算法陷入局部最优解,提高解的精确性,加快收敛速度。采用 Matlab 仿真软件,对水域环境地图及采样点分布情况进行建模。分

收稿日期:2021-05-13

基金项目:山东省重点研发计划(2019GHY112018);山东省高等学校青创科技支持计划(500076);山东省高等学校科技计划项目资助项目(KJ2018BBA015);山东交通学院科研启动基金(50004907);中国交通教育研究会交通教育科学研究课题(JTYB20-211)

第一作者简介:官月红(1982—),女,河北衡水人,讲师,工学博士,主要研究方向为智慧航运,E-mail:gongyuehong@sdjtu.edu.cn。

别采用传统 PSO 及优化后的 PSO 对 USV 进行全局路径规划比较,验证路径规划的效果。

1 USV 路径规划问题模型

采用 USV 对一定水域范围内若干个采样点进行自动巡检采样,首先规划 USV 的行驶路径,目的是在起始点与目的地之间产生一条路径,保证采样点均被巡检测到,除起始点外,其余采样点只巡检 1 次。受限于 USV 的续航能力,规划的路径总长应尽可能短,这相当于求解 TSP 问题。假设有 N 个采样点,可选择的路径为 $M=N!/(2N)$ 条,如果采用常规的穷举法寻找最短路径,计算量较大,当采样点数目达到一定规模时将难以实现,应选择合适的寻优算法。

TSP 问题假设有 1 个旅行商人要到 n 个城市,所要走的路径必须经过所有城市,且除了出发城市外,其余城市只访问 1 次。以规划路径总长为目标,在所有可能的路线中选择 1 条路径总长最短的路径。定义目标函数为 F , n 个城市的 TSP 问题数学模型为

$$F = \min \sum_{i=1}^{n-1} D(i, i+1) + D(1, n),$$

式中 $D(i, i+1)$ 为城市 i 到城市 $i+1$ 间的距离。

若 $D(i, j) = D(j, i)$, $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$, 则称为对称 TSP 问题,否则为不对称 TSP 问题。本文中 USV 多点采样问题为对称 TSP 问题。

2 遗传-粒子群算法

2.1 传统粒子群算法

传统 PSO 模拟鸟群寻找食物时趋向于靠近离食物最近的同类位置,在每次迭代后都离食物位置更近一些,直到找到食物为止。每只鸟可视作 1 个粒子,即 1 个搜索个体。每个粒子都有 1 个由被优化的函数决定的适应度,每个粒子都有粒子所在位置和粒子速度 2 个属性。在寻优过程中,每 1 代粒子所在的位置和搜索速度都发生变化。当寻找空间是 1 个多维向量时,位置和速度也是多维向量。假设 n 维空间中有 m 个个体,第 i 个个体位置为 \mathbf{X}_i ,速度为 \mathbf{v}_i ,公式分别为:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_i &= (X_{i1} X_{i2} \cdots X_{in}), \\ \mathbf{v}_i &= (v_{i1} v_{i2} \cdots v_{in}). \end{aligned}$$

每次迭代需找到粒子自身历史最优位置 P_{pbest} (即局部最优)及群体最优位置 P_{gbest} (即全局最优),更新速度与位置信息的公式为

$$v_{id}(t+1) = \omega v_{id}(t) + c_1 R_1 (P_{pbest} - X_{id}) + c_2 R_2 (P_{gbest} - X_{id}), i = 1, 2, \dots, m, d = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

$$X_{id}(t+1) = X_{id}(t) + v_{id}(t+1), i = 1, 2, \dots, m, d = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

式中: $v_{id}(t)$ 为粒子第 t 代的速度; $v_{id}(t+1)$ 为粒子第 $t+1$ 代的速度; ω 为惯性权重,决定算法的搜索速度; c_1 、 c_2 为参数,分别决定粒子向自身最优和种群最优靠近的速度; R_1 、 R_2 为随机数, R_1 、 $R_2 \in [0, 1]$ 。

本文中适应度对应 USV 巡检采样路径总长,适应度

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(y_{i+1} - y_i)^2 + (x_{i+1} - x_i)^2}, \quad (3)$$

式中: x_i 、 y_i 分别为第 i 个采样点的横坐标、纵坐标, x_{i+1} 、 y_{i+1} 分别为第 $i+1$ 个采样点的横、纵坐标。

PSO 的收敛速度取决于 ω : ω 较大时,算法全局搜索能力较强,适用于全局搜索; ω 较小时,算法搜索精度高,更适用于局部搜索。采用 PSO 求解 TSP 问题时,1 条可能的路径,即按旅行商访问城市的顺序组成的城市序列相当于 1 个粒子,所有可能的路径相当于粒子种群。用城市序列表示粒子的位置,用交换序列表示粒子速度,通过交换城市位置实现寻优计算过程。

2.2 传统遗传算法

GA 模仿自然界中生物体的进化规律,通过复制、杂交、变异将群体逐代进化,通过评估个体的适应度淘汰较差个体,逐步找到最优个体。交叉操作是对父代个体进行基因交换重组,产生新个体,交叉公式为

$$a_{kj} = a_{kj}(1 - p) + a_{lj}p,$$

$$a_{lj} = a_{lj}(1 - p) + a_{kj}p,$$

式中: a_{kj} 为第 k 条染色体上第 j 个基因的编码; a_{lj} 为第 l 条染色体上第 j 个基因的编码; p 为随机数, $p \in [0, 1]$ 。

变异操作类似生物进化过程中的基因突变现象,采用某种方式将染色体中的基因替换为新染色体,增强进化活力,形成新个体。采用 GA 解决 TSP 问题时,编码相当于 1 组城市序列;交叉操作是指交换 2 组城市序列中的部分城市,形成 2 组新的城市序列。假设 2 组城市路径序列编码分别为 0 123 456 789, 0 546 921 783,若执行交叉操作交换部分编码,得到的 2 组序列分别为 0 126 451 789, 0 543 926 783,序列中有重复部分。根据交换的 2 组基因建立映射关系,通过映射关系将基因“1”转变为基因“3”。重复部分都得到映射后,交叉后的 2 组路径序列为 0 326 451 789 和 0 543 926 781。变异操作是指将路径序列中的某些城市用该序列中的其他等位城市替换,形成新的路径序列。路径序列 0 123 456 789 经过突变后变为 0 120 456 789,路径中城市编码值“0”重复,缺少码值“3”,故用码值“3”替换码值“0”,得到变异后的路径序列为 3 120 456 789。

2.3 结合 GA 的 PSO

为了解决传统 PSO 易陷入局部最优解,产生早熟收敛等问题,在算法迭代过程中引入交叉、变异操作;为加速算法的收敛,随着迭代次数的增加对 ω 进行自适应调整,公式为

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{t_{\max}},$$

式中: ω_{\max} 、 ω_{\min} 分别为 ω 的最大值和最小值,按照经验取 $\omega_{\max} = 0.9$, $\omega_{\min} = 0.4$; t_{\max} 为设定的最大迭代次数; t 为当前的迭代次数。

改进 PSO 算法具体步骤包括:1)初始化粒子种群,设定参数;2)计算每个粒子的适应度;3)寻找局部最优 P_{pbest} 及全局最优 P_{gbest} ;4)根据式(1)(2)计算各个粒子下一时刻的位置及速度;5)引入交叉、变异操作,与 P_{pbest} 和 P_{gbest} 进行交叉,在位置、速度更新后重新计算适应度,如果路径变短,则保留新的粒子位置,否则舍弃;6)判断是否达到最优解,判断条件包括适应度相对于上一次迭代变小的幅度是否大于设定适应度及是否达到最大迭代次数,若满足判断条件,则寻优结束;若不满足条件,返回步骤 2)重复进行。

3 仿真结果

为了验证改进 PSO 算法的路径规划效果,采用 MATLAB 软件对路径规划过程进行数值模拟。在 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 面积的水域范围内,设置 50 个采样点。分别采用传统 PSO、传统 GA、改进后的 PSO 进行全局路径规划。设定粒子种群规模为 200,最大迭代次数为 500 次。

图 1、2 为采用传统 PSO 和传统 GA 做路径规划的仿真示意图和适应度迭代过程。图 3、4 为改进的 PSO 做路径规划的仿真示意图和适应度迭代过程。

由图 1、2 可知:采用传统 PSO 和传统 GA 规划的路径,交叉次数较多。算法开始后,随着迭代次数的增加,适应度趋于稳定。经过 500 次迭代,图 2a)、2b)的路径总长分别为 606.6、618.2 m。

由图 3、4 可知:采用改进的 PSO 规划路径,发生交叉的次数明显减少,经过 500 次迭代后,得到路径总长为 285.3 m。改进算法收敛迅速,路径复杂度大大降低。

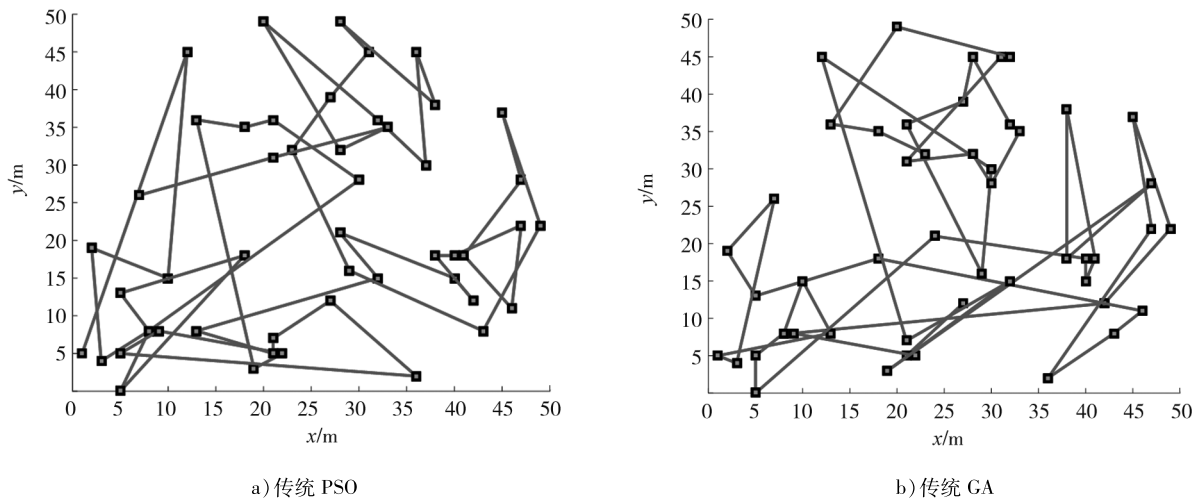


图1 传统算法的路径规划结果

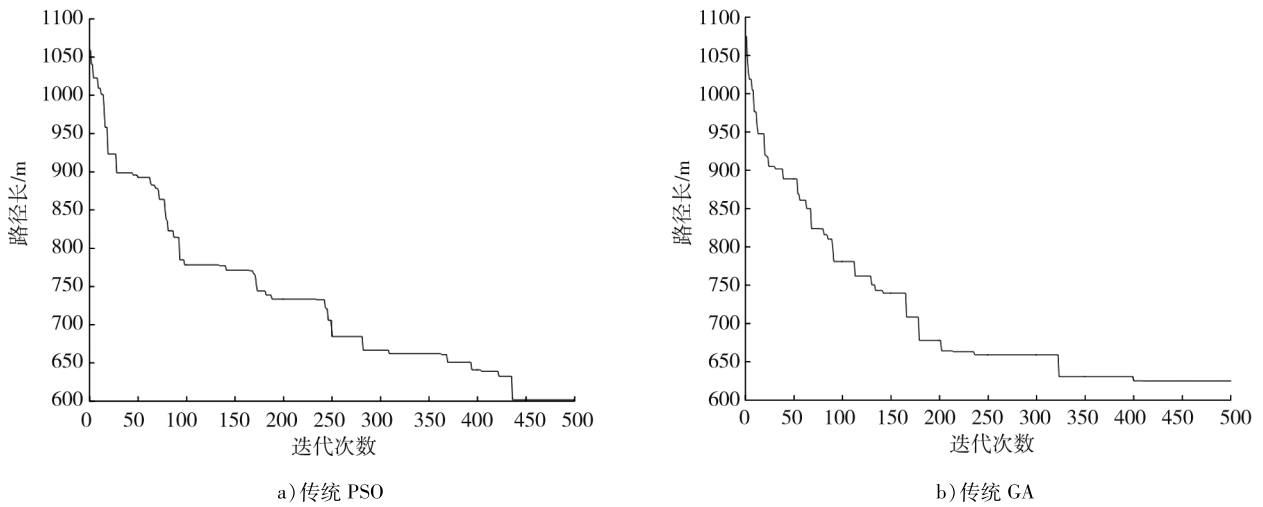


图2 传统算法适应度迭代过程

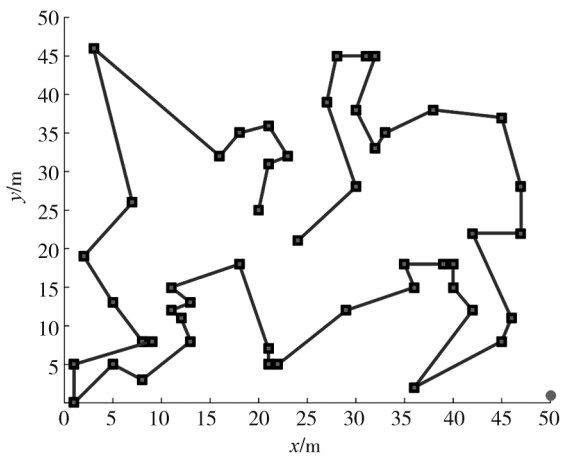


图3 改进的 PSO 路径规划结果

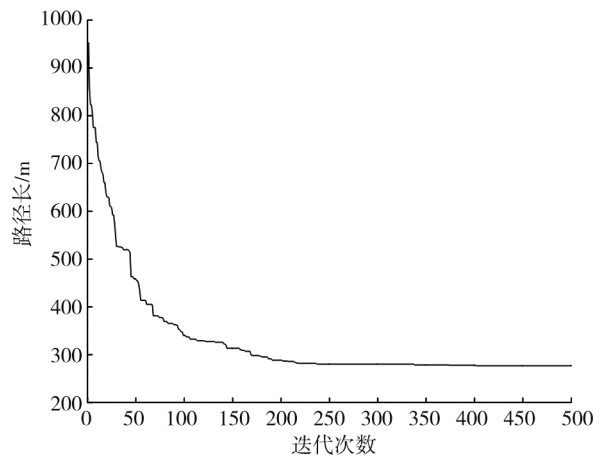


图4 改进的 PSO 适应度迭代过程

采用传统 PSO、传统 GA 和改进 PSO 对不同采样点数进行全局路径规划的结果如表 1 所示。由表 1 可知:采用改进的 PSO 进行规划,比采用传统 PSO 和 GA 的路径总长明显变短。

4 结论

1) 采用 USV 对水域环境进行巡检采样需对 USV 行驶路线进行路径规划,这就相当于采用智能算法求解旅行商问题。

2) 在传统 PSO 寻优过程中引入交叉、变异思想,增强算法跳出局部最优解的能力,缓解早熟收敛,有效减少路径交叉几率,缩短全局路径总长。

3) 在寻优过程中根据迭代次数自适应调整惯性权重,加速算法收敛,缩短 USV 路径规划的时间,减少计算量。

参考文献:

- [1] 李梅娟,陈雪波,张梅凤. 基于群集智能算法的路径规划问题[J]. 清华大学学报(自然科学版),2007,47(增刊2):1770-1773.
LI Meijuan, CHEN Xuebo, ZHANG Meifeng. Path planning based on the swarm intelligence algorithm[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology),2007,47(Suppl. 2):1770-1773.
- [2] 王洪斌,郝策,张平,等. 基于 A* 算法和人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 中国机械工程,2019,30(20):2489-2496.
WANG Hongbin, HAO Ce, ZHANG Ping, et al. Path planning of mobile robots based on A* algorithm and artificial potential field algorithm[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(20):2489-2496.
- [3] SHI Y H, EBERHART R C. Empirical study of particle swarm optimizer[C]//Proceeding of Congress on Evolutionary Computation. Piscataway, USA:IEEE Service Center, 1999:1945-1949.
- [4] 赵宝强. 基于粒子群改进算法的水下滑翔机路径优化[J]. 舰船科学技术,2015,37(8):140-145.
ZHAO Baoqiang. Underwater glider path optimization based on improved particle swarm algorithm[J]. Ship Science and Technology,2015,37(8):140-145.
- [5] 刘萌,徐陶阳,李常刚,等. 基于粒子群算法的受端电网紧急切负荷优化[J]. 山东大学学报(工学版),2019,49(1):120-128.
LIU Meng, XU Taoyang, LI Changgang, et al. Optimization of emergency load shedding of receiving-end power grid based on particle swarm optimization[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2019, 49(1):120-128.
- [6] 康玉祥,姜春英,秦运海,等. 基于改进 PSO 算法的机器人路径规划及实验[J]. 机器人,2020,42(1):71-78.
KANG Yuxiang, JIANG Chunying, Qin Yunhai, et al. Robot path planning and experiment with an improved PSO algorithm[J]. Robot, 2020, 42(1):71-78.
- [7] PARSOPOULOS K E, VRAHATIS M N. Recent approaches to global optimization problems through particle swarm optimization[J]. Natural Computing,2002,1(2/3):235-306.
- [8] 练青坡,王宏健,袁建亚,等. 基于粒子群优化算法的 USV 集群协同避碰方法[J]. 系统工程与电子技术,2019,41(9):2034-2040.
LIAN Qingpo, WANG Hongjian, YUAN Jianya, et al. USV cluster collision avoidance based on particle swarm optimization algorithm[J]. System Engineering and Electronics,2019,41(9):2034-2040.
- [9] 王学武,严益鑫,顾幸生. 基于莱维飞行粒子群算法的焊接机器人路径规划[J]. 控制与决策,2017,32(2):373-377.
WANG Xuewu, YAN Yixin, GU Xingsheng. Welding robot path planning based on Levy-PSO[J]. Control and Decision, 2017, 32(2):373-377.
- [10] 孙兵,朱大奇,杨元元. 基于粒子群优化的自治水下机器人模糊路径规划[J]. 高技术通讯,2013,23(12):1284-1291.
SUN Bing, ZHU daqi, YANG Yuanyuan. Fuzzy path planning for autonomous underwater vehicles based on particle swarm optimization[J]. Chinese High Technology Letters,2013,23(12):1284-1291.
- [11] 张岳星,王轶群,李硕,等. 基于海图和改进粒子群优化算法的 AUV 全局路径规划[J]. 机器人,2020,42(1):120-128.

表1 传统 PSO、传统 GA 与改进 PSO 规划路径总长 m

采样点数	传统 PSO	传统 GA	改进 PSO
20	159.0	155.7	146.4
30	230.6	266.4	176.5
40	379.8	421.3	245.7
50	606.6	618.2	285.3
60	698.3	777.3	306.9

- ZHANG Yuexing, WANG Yiqun, LI Shuo, et al. Global path planning for AUV based on charts and the improved particle swarm optimization algorithm[J]. Robot, 2020, 42(1): 120-128.
- [12] 张万绪, 张向兰. 基于改进粒子群算法的智能机器人路径规划[J]. 计算机应用, 2014, 34(2): 510-513.
ZHANG Wanxu, ZHANG Xianglan. Path planning for intelligent robots based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(2): 510-513.
- [14] 宗陈, 于家斌, 王小艺, 等. 巡航船污染水质采集路径规划仿真研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(9): 338-342.
ZONG Chen, YU Jiabin, WANG Xiaoyi, et al. Simulation research on polluted water quality acquisition path planning of cruise ship[J]. Computer Simulation, 2018, 35(9): 338-342.
- [13] 崔瑾娟. 基于遗传算法规划路径的船舶避碰系统[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(6A): 43-45.
CUI Jinjuan. Ship collision avoidance system based on genetic algorithms for path planning[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(6A): 43-45.
- [15] YANG Ning, TIAN Weifeng, JIN Zhihua. Crossover tabu search for traveling salesman problem[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(4): 897-899.
- [16] 申铨京, 刘阳阳, 黄永平, 等. 求解 TSP 问题的快速蚁群算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(1): 147-151.
SHEN Xuanjing, LIU Yangyang, HUANG Yongping, et al. Fast ant colony algorithm for solving traveling salesman problem [J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2013, 43(1): 147-151.
- [17] 王宇平, 李英华. 求解 TSP 的量子遗传算法[J]. 计算机学报, 2007, 30(5): 748-755.
WANG Yuping, LI Yinghua. A novel quantum genetic algorithm for TSP[J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(5): 748-755.
- [18] LAPORTE G. The TSP: an overview of exact and approximate algorithms[J]. European Journal of Operation Research, 1992, 59(1): 231-247.

USV path planning method based on GA-PSO

GONG Yuehong, ZHANG Shaojun, WANG Mingyu, MENG Xiongfei

Shipping College, Shandong Jiaotong University, Weihai 264209, China

Abstract: In order to solve the problem of precocity convergence when traditional particle swarm optimization algorithm (PSO) is applied to unmanned surface vessel (USV) path planning, a PSO algorithm based on genetic algorithm (GA) is proposed. In this algorithm, the crossover and mutation operations of GA are introduced into the traditional PSO to avoid the algorithm entering local optimal solution. The convergence of the algorithm is accelerated by adaptively adjusting of the inertia weight. MATLAB simulation tool is used to model the environment of USV patrol area, and the improved PSO is used to carry out path planning. Simulation results show that, compared with traditional PSO and GA, the proposed algorithm can effectively reduce the path intersection points, thus greatly shorten the overall path length and the convergence time of the algorithm.

Keywords: USV; route planning; PSO; GA; crossover and mutation

(责任编辑:郭守真)