

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2020.03.007

## 基于组合策略的无人艇路径规划方法

吴 鹏<sup>1,2</sup>, 周倩如<sup>3</sup>, 余 双<sup>1,2</sup>, 段锁林<sup>1,2</sup>, 张 屹<sup>1,2</sup>

(1. 常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 常州大学 城市轨道交通学院, 江苏 常州 213164;  
3. 华东疗养院 药剂科, 江苏 无锡 214065)

**摘要:**在水面无人艇导航模块中, 自主路径规划处于核心地位, 而路径规划控制策略又是其中的关键因素。传统的无人艇路径规划算法普遍存在固有缺陷, 也无法将局部和全局路径规划方法无缝集成, 因而效率较低。针对以上问题提出一种结合了局部和全局路径规划算法的组合策略。在全局算法方面采用势场蚁群算法(APF-ACO), 水面无人艇在巡航之前, 将会在指定的电子地图上规划相对最优路径, 解决了传统蚁群算法(ACO)存在的过早收敛和效率低的问题; 局部算法方面采用改进后的人工势场法, 该方法针对未知环境进行实时路径规划, 解决了传统势场法中存在的局部极小和目标不可达问题。对所提出的改进方法进行了仿真分析, 结果表明所提出的控制方法具有可行性。

**关键词:**水面无人艇; 路径规划; 蚁群算法; 人工势场法

中图分类号: TP 270

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2020)03-0047-06

## Research on Unmanned Surface Vehicle Path Planning Based on Composition Control Strategy

WU Peng<sup>1,2</sup>, ZHOU Qianru<sup>3</sup>, YU Shuang<sup>1,2</sup>, DUAN Suolin<sup>1,2</sup>, ZHANG Yi<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. School of Urban Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 3. Pharmacy of Huadong Sanatorium, Wuxi 214065, China)

**Abstract:** Autonomous path planning is the core in the navigation module of unmanned surface vehicle, and the path planning control strategy is a key factor. Traditional path planning algorithms generally has inherent defects. It cannot integrate local path planning algorithm with the global seamlessly, and it is inefficient. A combination strategy is proposed for the above problems, and it is combined with the local and global path planning algorithm. The potential field-ant colony optimization of the global

收稿日期: 2019-11-04。

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究面上资助项目(18KJB413001); 常州市科技计划资助项目(CJ20180034)。

作者简介: 吴鹏(1987—), 男, 江苏溧阳人, 博士, 讲师。通信联系人: 周倩如(1988—), E-mail: wupeng1987@cczu.edu.cn

引用本文: 吴鹏, 周倩如, 余双, 等. 基于组合策略的无人艇路径规划方法[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2020, 32(3): 47-52.

one is applied for solving the problems about premature convergence and low efficiency. It can plan a relative optimal path on the specified electronic map before the cruising the unmanned surface vehicle. The improved artificial potential field algorithm in the local algorithm can solve problems of the local minimum and GNRON in the traditional method by aims at generating a real-time path planning in the unknown environment mostly. The feasibility of the method is proved by simulations.

**Key words:** unmanned surface vehicle; path planning; ant colony optimization; artificial potential field

在中国加速推进海洋强国的战略决策下,水面无人艇日益受到国家的高度重视。有效而可行的自主路径规划控制策略是水面无人艇自主化、智能化程度的关键标识<sup>[1]</sup>。因此,对于路径规划控制策略的研究,受到了国外学者的广泛关注。HAN 等<sup>[2-3]</sup>提出了一种基于船体位置推算传感器和激光雷达的高精度导航技术,通过融合摄像头和激光雷达测量数据,对周围结构进行三维重建,建立了导航运动控制模型。PLUMET 等<sup>[4]</sup>提出了一种新的反应式导航方法,该方法用在船体位置周围建立的局部势场来表示环境和船体的导航约束,并根据风向和实时检测障碍物的变化周期性的结果更新势场,实时计算出船体的航行角。与此同时,国内学者也做了大量工作:韩鑫等<sup>[5]</sup>基于过渡圆弧半径求解的方法,研究了无人艇的循迹控制;冯爱国等<sup>[6]</sup>通过建立无人艇自动避碰决策仿真系统,对无人艇进行模拟测试并进行相关分析;彭艳等<sup>[7]</sup>提出了在三维空间内,基于切点优化人工势场法的机器人路径规划算法,利用切点法和等分点法进行航迹规划<sup>[8-10]</sup>。

综上所述,国内外学者的研究重点还是集中于对某单一路径规划算法的改进,对于全局路径规划算法与局部路径规划算法结合方面却鲜有研究。针对这个问题,文章提出一种组合控制策略。

## 1 传统蚁群算法

意大利学者 M. Dorigo<sup>[11]</sup>在其博士论文中首先提出蚁群算法。蚁群算法主要是通过蚂蚁群体之间的信息传递而达到寻优的目的,具有寻优能力强、环境适应性强等特点。

在数量为  $m$  的蚁群中,每只蚂蚁采用并行的方式构建路径,并按照一定的状态转移概率选择下一步到达的位置。假设蚂蚁  $k$  在第  $t$  步从  $P_t(x, y) = i$  即第  $i$  个路径节点移动至  $P_{t+1}(x, y) = j$  即第  $j$  个路径节点,蚂蚁根据概率转移规则选择下一步位置,每只蚂蚁的转移概率可表示为

$$p_{ij}^t(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{j \in J_k(i)} [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta} & j \in J_k(i) \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $J_k(i)$  为蚂蚁  $k$  可以在走下一步时从中选择的位置;  $\alpha, \beta$  分别为信息素和启发因子的相对重要度;  $\eta_{ij}$  为启发因子,具体可表示为

$$\eta_{ij}(t) = \frac{1}{d(P, G)} \quad (2)$$

式中  $d(P, G)$  为机器人当前所在位置与目标点之间的距离。

当所有蚂蚁都构建好路径后,各边上的信息素将会被更新,信息素的蒸发公式为

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \tau_{ij}, \forall (i, j) \in L \quad (3)$$

式中  $\rho$  为信息素的蒸发率,有  $0 < \rho \leq 1$ 。

由上述分析可知,传统的蚁群算法具有一定的随机性,算法对路径选择随机性较强,运算量大,耗时长,收敛速度较慢,出现过早收敛即“早熟”现象,因此有必要进行改进优化<sup>[11]</sup>。

## 2 基于障碍物边界检测人工势场法

### 2.1 传统算法分析

人工势场法是实现水面无人艇避障的经典算法之一,但经典人工势场法在其广泛应用中也暴露了其固有缺陷,主要是目标不可达问题和局部极小问题<sup>[12]</sup>。具体如下:

#### 1) 目标不可达问题

当目标位置附近存在障碍物的情况下,无人艇不受斥力影响,而只存在引力作用时,随着无人艇不断接近目标点,其受到附近障碍物斥力影响越来越大;而在某一位置,出现无人艇所受引力小于斥力时,无人艇仍朝着目标运动,但最终无法到达目标点。如图1所示,所规划的路径最终无法收敛。

#### 2) 局部极小问题

在人工势场法中,局部极小问题是指在经典人工势场法进行避障过程中,由于受到不同障碍物的位置、形状的影响,无人艇运动处于暂时停滞徘徊状态,如图2所示,这种现象即是局部极小。

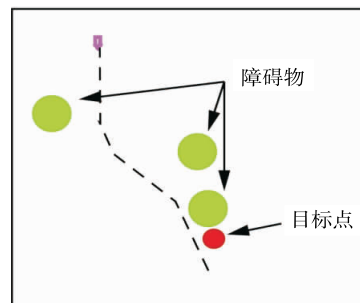


图1 目标不可达现象

Fig.1 Goal unreachable phenomenon

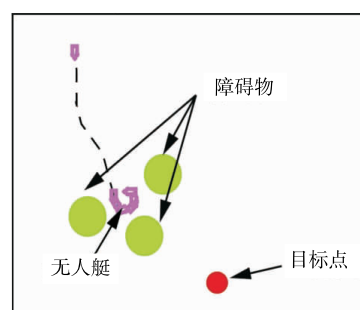


图2 局部极小现象

Fig.2 Local minima phenomenon

### 2.2 算法改进

根据对经典人工势场法的讨论,在无人艇进行路径规划时,为了解决局部极小和目标不可达问题,增加了一个修正因子,实质上是考虑了无人艇与目标间的相对距离,新的斥力势场函数为

$$U_{\text{rep}}(X) = \begin{cases} 1/2K_{\text{rep}} (1/d(X,O) - 1/d_0)^2 d^n(X,G) & d(X,O) < d_0 \\ 0 & d(X,O) \geq d_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $d(X,G)$ 为无人艇与目标位置之间的相对距离; $n$ 为斥力场修正因子。

由式(4)计算出下一步运动的方向角及路径点位置:

$$\theta = \arctan \frac{F_{ay}(X, X_t) + F_{r1y}(X, X_0) + F_{r2y}(X, X_0)}{F_{ax}(X, X_t) + F_{r1x}(X, X_0) + F_{r2x}(X, X_0)} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x' = x + l \cos \theta \\ y' = y + l \sin \theta \end{cases} \quad (6)$$

式中: $x', y'$ 为下一路径点的位置; $x, y$ 为当前路径点的位置; $l$ 为算法步长。

## 3 势场蚁群算法

势场蚁群算法中,启发式信息由势场力启发式信息和距离启发式信息构成,可表示为

$$\eta_{ij}(t) = \eta_F(t) \cdot \eta_d(t) \quad (7)$$

式中: $\eta_d(t)$ 为距离启发信息; $\eta_F(t)$ 为势场力启发信息。其中 $\eta_d(t)$ 和 $\eta_F(t)$ 可分别表示为:

$$\eta_d(t) = \frac{1}{d(P, T)} \quad (8)$$

$$\eta_F(t) = \lambda a^{F \cos \theta} \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{K - K_m}{K} \quad (10)$$

式中:  $d(P, T)$  为当前节点  $P$  和目标点  $T$  的距离;  $\lambda$  为指示势场力启发信息影响系数;  $K$  和  $K_m$  分别为避障中的最大迭代次数和当前迭代次数;  $a$  为一个常数并且  $a > 1$ ;  $F$  为势场合力;  $\theta$  为势场合力与可行路径的夹角。

## 4 仿真分析与实验

### 4.1 改进人工势场法仿真分析

假设目标位置在坐标原点  $(0, 0)$ , 障碍物位置为  $(0.6, 0)$ , 无人艇当前路径点  $(-1.5, 0)$ , 沿  $x$  轴正方向朝目标点运动, 图 3 表示当  $K_{\text{rep}} = K_{\text{att}} = 1, d_0 = 2$ ,  $n$  分别为  $0.1, 0.5, 1, 1.5, 2, 3$  时, 无人艇所受到的总势场变化。由图 3 可知, 当  $n > 1$  时, 只存在全局最小, 当  $n < 1$  时, 势场曲线发生形变, 并在趋向目标点的过程中存在局部极小点,  $n$  越小, 无人艇在趋向目标点过程中, 所受的总势场曲线形变越大, 并存在局部极小值。因此, 为了保证路径收敛, 同时避免发生局部极小, 修正因子  $n$  应取值大于 1。但  $n$  取值过大也会增加算法的计算量, 不利于算法的有效执行, 降低了算法的效率, 因此, 可取  $n = 2$ , 则总势场函数可表示为

$$U_{\text{art}} = \begin{cases} 1/2K_{\text{rep}} (1/d(X, O) - 1/d_0)^2 d^2(X, G) + 1/2K_{\text{att}} d^2(X, X_t) & d(X, O) < d_0 \\ 1/2K_{\text{att}} d^2(X, X_t) & d(X, O) \geq d_0 \end{cases} \quad (11)$$

当  $K_{\text{rep}} = K_{\text{att}} = 1, d_0 = 2, n = 2$  时, 如图 4 所示, 其中, 目标位置在坐标原点  $(0, 0)$ , 障碍物位置为  $(0.6, 0)$ , 无人艇当前路径点  $(-1.5, 0)$ , 由图 4 可知, 在无人艇朝目标点运动过程中, 无人艇所处的势场环境中, 无人艇在目标点处总势场最小, 即该处势场为全局最小值, 并且不存在局部极小点, 由此可证明采用该参数所构建的势场函数是合理的。

设其相关参数为  $K_{\text{rep}} = K_{\text{att}} = 1, d_0 = 2, n = 2$ , 利用改进后的人工势场法进行路径规划仿真模拟。如图 5 和图 6 所示, 假设起始点坐标为  $(0, 0)$ , 目标

点坐标为  $(10, 10)$ , 障碍物坐标分别为  $(1.5, 1.5), (3, 3), (4, 4.5), (3, 6), (3, 3), (4.5, 4), (5.5, 5.5), (6, 2), (8, 7), (8, 8), (9, 8)$ , 在上述相同条件下, 分别采用常规人工势场算法和针对目标不可达问题采取的添加修正因子的改进人工势场法, 进行避障仿真。由图 5 和图 6 分析可知, 在二维空间中, 若在目标点附近存在障碍物, 采用常规人工势场法, 规划出的路径会与目标点附近障碍物交叉(图 5), 因而路径实际上是不可行的, 采用添加修正因子的改进后的算法, 规划出的路径可以有效避开目标点附近障碍物(图 6), 因而改进算法是有效的。

### 4.2 势场蚁群算法仿真分析

依据改进算法步骤, 进行仿真分析。理想算法参数的设置是通过大量实验获得的, 设置引力增益系

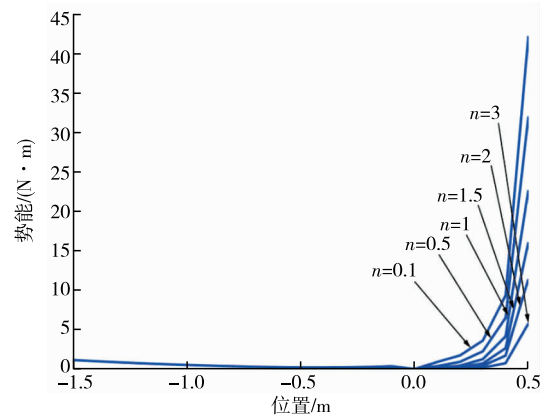


图 3 势场变化曲线

Fig.3 Potential field change curve

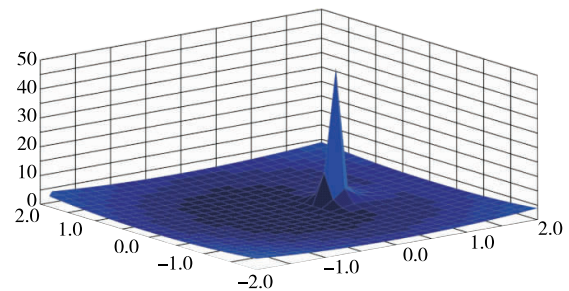


图 4 总势场变化曲面

Fig.4 Surface of change in the total potential field

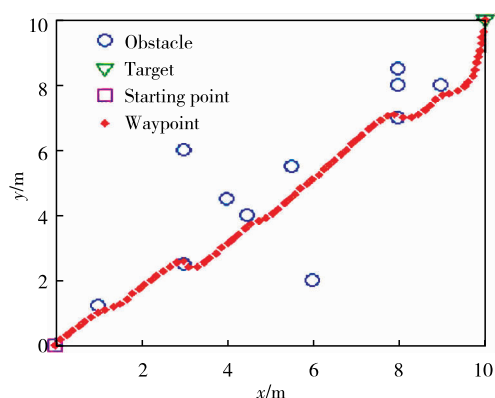


图5 常规 APF 算法路径规划仿真轨迹

Fig.5 Conventional APF algorithm path trajectory

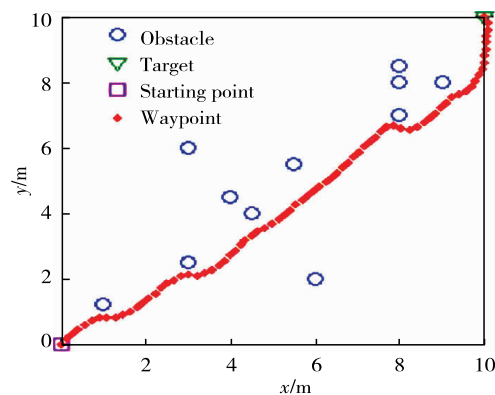
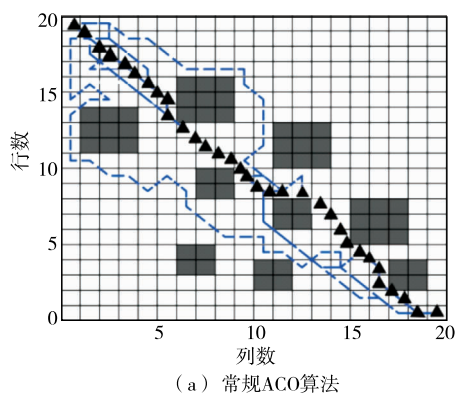


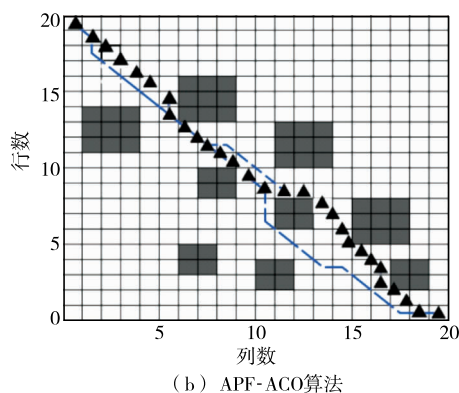
图6 改进 APF 算法路径规划仿真轨迹

Fig.6 Improved APF algorithm path trajectory

数  $k=20$ , 斥力增益系数  $\eta=10$ , 初始步长  $l^*=0.1\text{ m}$ ; 种群数的设置不能降低算法寻优能力, 设种群数  $m=50$ , 信息素和启发信息相对重要度设为  $\alpha=1, \beta=10$  (不能减小信息素和启发信息的性能), 蒸发率设为  $\rho=0.4$ , 初始信息素值为  $\tau_0=80$ ; 依据无人艇具体尺寸  $6.28\text{ m} \times 2.22\text{ m}$ , 根据栅格法环境建模理论, 设置栅格边长为  $6.3\text{ m}$ , 假设离线地图为  $20 \times 20$  的二值化栅格地图, 仿真结果如图 7 所示。三角线表示最短路径, 虚线表示 2 种算法规划的其他路径, 在  $20 \times 20$  的栅格模型上, 势场蚁群算法计算路径数较少。



(a) 常规ACO算法



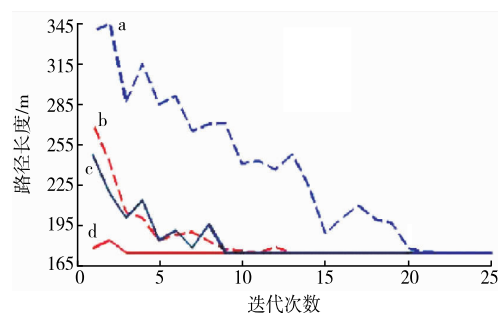
(b) APF-ACO算法

图7 ACO 算法与 APF-ACO 算法路径规划仿真结果

Fig.7 Simulation results of the algorithm ACO and algorithm APF-ACO for path planning

如图 8 中, b 线和 d 线分别表示在避障仿真过程中, 改进势场蚁群算法平均路径和常规蚁群算法平均路径, a 线和 c 线分别表示势场蚁群算法路径和常规蚁群算法路径。如图 8 所示, 势场蚁群算法的收敛曲线、收敛速度明显快于常规蚁群算法。

由表 1 仿真结果数据可知, 与在相同情况下, 常规蚁群算法相比, 势场蚁群算法最短路径迭代次数减少 67%, 最大迭代次数减少 38.1%, 最短路径长度及平均路径长度与常规蚁群算法相比, 分别减少 2% 和 1.5%。因此, 在相同情况下, 与常规算法相比, 势场蚁群算法运算量小, 收敛速度快, 精度更高。



说明: a—ACO 平均路径; b—APF-ACO 平均路径; c—ACO 最短路径; d—APF-ACO 最短路径。

图8 APF-ACO 算法与常规 ACO 算法对比示意图

Fig.8 Contrast diagram of algorithm ACO and algorithm APF-ACO

表 1 仿真数据对比

Table1 Comparison of simulation data

算法类别	平均路径长度/m	最短路径长度/m	最短路径迭代次数	最大迭代次数
势场蚁群算法	182.27	180.33	3	13
常规蚁群算法	184.97	184.02	9	21

## 5 结 论

无人艇的路径规划控制策略是无人艇导航控制的关键任务,针对传统的人工势场法及蚁群算法存在的问题,提出了改进人工势场法与改进蚁群算法相结合的组合控制策略。在局部路径规划上,利用增加修正因子的方法,对传统人工势场法进行改进,可有效解决普遍存在的目标不可达和局部极小的固有缺陷。在此前提下,将传统的蚁群算法与改进的人工势场法相结合,组合成势场蚁群算法,在同一栅格地图环境下,势场蚁群算法与传统蚁群算法相比,改进势场蚁群算法最短路径迭代次数减少 67%,最大迭代次数减少 38.1%,最短路径长度及平均路径长度分别减少 2%和 1.5%,由此可知,改进算法规划出的轨迹效果更好。

## 参考文献:

- [1]范云生,柳健,王国峰,等.基于异源信息融合的无人水面艇动态路径规划[J].大连海事大学学报,2018,44(1):9-14.
- [2]HAN J, PARK J, KIM T, et al. Precision navigation and mapping under bridges with an unmanned surface vehicle[J]. Autonomous Robots, 2015, 38(4):349-362.
- [3]HAN J, CHEN M S, YU P S. Data mining: an overview from a database perspective[J]. IEEE Transactions on Knowledge & Data Engineering, 1996, 8(6):866-883.
- [4]PLUMET F, PÊTRÈS C, ROMERO-RAMIREZ M A, et al. Toward an autonomous sailing boat[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2015, 40(2):397-407.
- [5]韩鑫,徐海祥,余文墨,等.基于过渡圆弧半径求解方法的无人艇循迹控制研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2018(5):783-787.
- [6]冯爱国,刘锡祥,吴炜.水面无人艇导航与控制系统设计与实现[J].火力与指挥控制,2017,42(8):150-154.
- [7]彭艳,国文青,刘梅,等.基于切点优化人工势场法的三维避障规划[J].系统仿真学报,2014,26(8):1758-1762.
- [8]李国进,陈武,易丐.基于改进人工势场法的移动机器人导航控制[J].计算技术与自动化,2017,36(1):52-56.
- [9]TU E, ZHANG G, RACHMAWATI L, et al. Exploiting AIS data for intelligent maritime navigation: a comprehensive survey from data to methodology[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018(99):1-24.
- [10]SCHEIDLER A, BRUTSCHY A, FERRANTE E, et al. The k-unanimity rule for self-organized decision making in swarms of robots[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 46(5): 1175.
- [11]DORIGO M. Optimization, learning and natural algorithms[D]. Padova: University of Padova, 1992.
- [12]董慧颖,段云波.水面无人艇运动控制系统建模与仿真[J].沈阳理工大学学报,2017,36(1):77-84.

(责任编辑:李艳,谭晓荷)