

基于蚁群算法的船舶自主避障路径规划

薛宗杭

(大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116000)

摘要: 针对船舶在海上航行自主避障问题, 文中结合人工势场法对蚁群算法的信息素更新策略、启发信息以及状态转移概率进行改进, 来实现船舶避障的全局与局部路径规划。使得船舶在海上航行时, 具有自主规划路径和动态避障的能力。通过模拟仿真来验证算法, 仿真实验结果表明所改进的蚁群算法能够规划出一条安全且平滑的最优路径, 证明了算法的有效性。

关键词: 路径规划; 蚁群算法; 人工势场法; 船舶避障

中图分类号: U692.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2023) 01-0019-03

引言

我国的十九大报告指出, 要“坚持陆海统筹, 加快建设海洋强国”, 充分体现了国家对海洋事业发展的重视。海洋事业的建设离不开航运业的发展, 航运安全是重中之重。海洋环境复杂多变, 常见的障碍物主要有浅滩、沉船、在航或锚泊船舶、航标、礁石等, 船舶在此类复杂的环境下自主航行, 必须要有合适的避障路径规划算法作为指导, 而船舶自主避障的科学问题就是路径规划问题。

针对上述问题, 国内外专家学者展开了一系列研究。郑中义等^[1]分析了船舶碰撞的本质, 建立了空间和时间碰撞危险度模型, 使得研究更符合逻辑, 具有应用价值。潘明阳^[2]使用电子海图信息技术, 在动态网格模型中规划出自动生成路径算法。Chang^[3]等针对船舶怎样避开碍航区以及在航线优化上对迷宫算法进行改进。Szlapczynski^[4]将海图栅格化, 在栅格地图中设计出引入转弯惩罚和碰撞因子的船舶航行方法。孟祥杜^[5]对使用蚁群算法对无人船路径规划做研究, 在蚁群算法中加入目标启发函数, 在蚂蚁行径过程中保存了历史信息素, 使得离散蚁群算法的路径规划效果更好。陈佳^[6]在此基础上, 对蚁群算法进行改进, 删除冗余点和改进转弯建模使规划出的航线更加平滑。刘琨^[7]将蚁群算法与人工势场法相结合, 利用人工势场法来进行局部路径规划, 使得路径规划效果更好。

综上所述, 针对船舶自主避障问题, 研究思路是围绕船舶路径规划这一科学问题做以具体研究。文中对复杂的海洋环境进行栅格化处理, 将蚁群算法和人工势场法相结合并作以改进, 来实现船舶避障的全局与局部路径规划, 最终通过模拟仿真来验证算法。使得船舶在海上航行时, 能够自主规划出一条安全且经济的航行。

一、蚁群算法概述

蚂蚁在觅食过程中总是能找到离自己最近的食物, 并且在返回巢穴过程中也能选择最优路线。蚁群能够产生这种觅食现象的原因是因为蚂蚁在寻找食物的过程中会释放信息

素, 根据信息素的差异大小来选择路线^[8]。基于上述蚂蚁的觅食现象, 学者设计了蚁群算法, 其基本原理正是基于信息素浓度的大小来进行路径规划。对于文中的船舶自主避障路径规划, 是在起始点和目标点之间寻找一条足够短、足够安全、足够平滑的无碰撞可行路径。

蚁群算法的数学模型如下: 假设蚁群中蚂蚁的数量为 M , 蚂蚁在寻路时根据路径中信息素的浓度决定下一步移动位置。定义 t 时刻蚂蚁 k 从位置 i 移动到位置 j 的概率为状态转移概率 $P_{ij}^k(t)$, 如下式所示:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{j \in allowed_k} [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}, & j \in allowed_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中, α 为信息启发因子; β 为期望启发因子; $allowed_k$ 表示蚂蚁 k 候选位置节点的集合; $\tau_{ij}(t)$ 为 t 时刻路径 (i, j) 间信息素浓度; $\eta_{ij}(t)$ 为 t 时刻路径 (i, j) 的启发函数。 d_{ij} 为路径 (i, j) 的距离。

$$\eta_{ij}(t) = \frac{1}{d_{ij}} \quad (2)$$

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3)$$

整个蚁群中信息素浓度有一定的更新调整, 才能使得整个蚁群正常运转, 信息素浓度更新策略如下:

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (4)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^M \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (5)$$

式中, $\tau_{ij}(t+n)$ 表示经过 n 时刻, 路径 (i, j) 上的信息素浓度; ρ 为信息素挥发系数; $(1-\rho)$ 为信息素残留系数; $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ 表示第 k 只蚂蚁在第 t 时刻经过路径 (i, j) 后, 路径中信息素的变化量。

二、蚁群算法的改进

收稿日期: 2022-03-18

作者简介: 薛宗杭 (1997-), 男, 大连海事大学, 硕士生。

蚁群算法虽然可以实现寻找最优路径,但在寻路的过程中存在一些不足如收敛速度慢、局部最优的问题。同时蚁群算法在面对全局路径规划较有优势,但面对局部规划时有些不足。为了解决以上算法的缺陷,借鉴人工势场法的原理,将其与蚁群算法相结合,解决算法的弊端。

1. 信息素更新策略的改进

在算法运行过程中,为防止路径中信息素浓度过小而导致算法出现停滞现象,以及因路径中信息素浓度过大导致陷入局部最优解,引入最小信息素浓度 $\tau_{\min}$ 和最大信息素浓度 $\tau_{\max}$, 具体如式 (7) 所示:

$$\tau_{ij}(t) = \begin{cases} \tau_{\min}, \tau_{ij}(t) < \tau_{\min} \\ \tau_{ij}(t), \tau_{\min} < \tau_{ij}(t) < \tau_{\max} \\ \tau_{\max}, \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

蚁群算法在初始阶段,由于路径中较低的信息素浓度使得蚂蚁盲目选择下一路径节点。针对此问题,对信息素更新策略作以改进,加入由势场影响所产生的信息素,改进如式 (8) 所示。

$$\tau_{ij}''(t) = \begin{cases} \tau_{ij}(t) + \delta\tau_{ij}'(t), t \leq t_a \\ \tau_{ij}(t), t > t_a \end{cases} \quad (8)$$

上式中, δ 为势场信息素系数, $\tau_{ij}'(t)$ 表示 t 次迭代后势场信息素, t_a 为势场信息素迭代次数上限,结合以上改进,信息素更新策略如下所示。

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho)\tau_{ij}''(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (9)$$

2. 启发函数的改进

针对算法在初始阶段,蚂蚁不能够依靠路径间信息素浓度的差异来选择路径,盲目寻路的问题,对启发函数进行改进,从全局性出发,加入全局终点对初始阶段蚂蚁在寻路时的方向影响,具体改进如下:

$$\eta_{ij}(t) = e^{-A} \cdot \frac{1}{d_{ij} \cdot d_{jG}} \quad (10)$$

$$d_{jG} = \sqrt{(x_j - x_G)^2 + (y_j - y_G)^2} \quad (11)$$

上式中, A 为常数, d_{jG} 为候选 j 到终点 G 的欧氏距离,使蚂蚁在寻路时,会始终受到终点的影响选择偏向终点位置的候选节点移动,改变算法初期盲目寻路,加快了收敛速度。

通过上述改进,启发信息受距离 d_{ij} 以及 d_{jG} 影响,为解决算法易陷入局部最优的问题,考虑到障碍物对启发信息的影响,引入由势场所影响的启发信息,表达式如下:

$$\eta_A(t) = a^{F(P) \cos \theta} \quad (12)$$

上式中, $\eta_A(t)$ 为势场启发信息, a 为系数, $F(P)$ 表示船舶在势力场中受到的势场合力, θ 表示势场合力 $F(P)$ 与船舶候选的下一节点方向夹角。

结合以上改进,改进后的启发函数如下所示:

$$\eta_{ij}'(t) = \eta_{ij}(t) \cdot \eta_A(t) = e^{-A} \cdot \frac{a^{F(P) \cos \theta}}{d_{ij} \cdot d_{jG}} \quad (13)$$

由上式分析可知,当船舶在势场中受到的斥力和引力相互抵消,即合力 $F(P)$ 等于 0 时, $\eta_A(t)$ 为常数 1,启发信息仍然存在并影响船舶向终点移动,解决了算法目标不可达的问题。

3. 状态转移概率改进

传统蚁群算法在寻路时,经常出现局部最优的现象,出现此类现象的原因是蚂蚁在对候选节点进行选择时,自身进入到凹状的障碍物或是周围节点均是已经走过的节点,遇到这种情况蚂蚁会选择在原地等待,而不会跳出局部最优解。为了改进这种算法在初期易进入局部最优的情况,在状态转移概率公式中加入稳定因子 S_j ,改进后的状态转移概率如下所示:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta \cdot (S_j)^\gamma}{\sum_{j \in allowed_k} [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta \cdot (S_j)^\gamma}, j \in allowed_k \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

$$S_j = \frac{T_j - O_j}{T_j} \quad (15)$$

上式中, T_j 为候选位置 j 周围相邻的栅格数量, O_j 为候选位置 j 周围存在的障碍物栅格数量和蚂蚁已经搜索过的存在于禁忌表中的栅格数量, γ 为稳定因子系数。通过改进状态转移概率公式,使得蚁群在面对凹状障碍物时能够摆脱死锁现象。

通过上述的改进,改进后的状态转移概率如下所示。

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}'(t)]^\beta \cdot (S_j)^\gamma}{\sum_{j \in allowed_k} [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}'(t)]^\beta \cdot (S_j)^\gamma}, j \in allowed_k \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

4. 算法流程

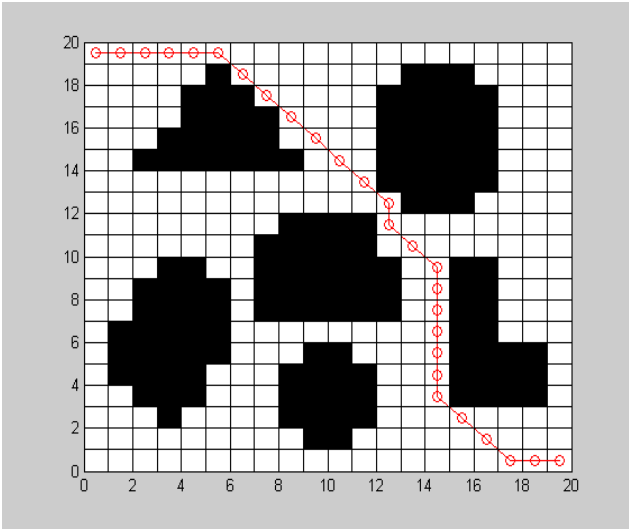
改进的蚁群算法的实施步骤如下:

- (1) 初始化参数。
- (2) 进行状态转移概率的计算,并记录下船舶走过的位置和路径信息;
- (3) 在完成一次迭代后,进行信息素更新策略;
- (4) 判断当前次数是否为迭代最大次数,如果符合条件,保存最优路径信息,否则继续进行迭代操作;
- (5) 输出最优路径信息,算法结束。

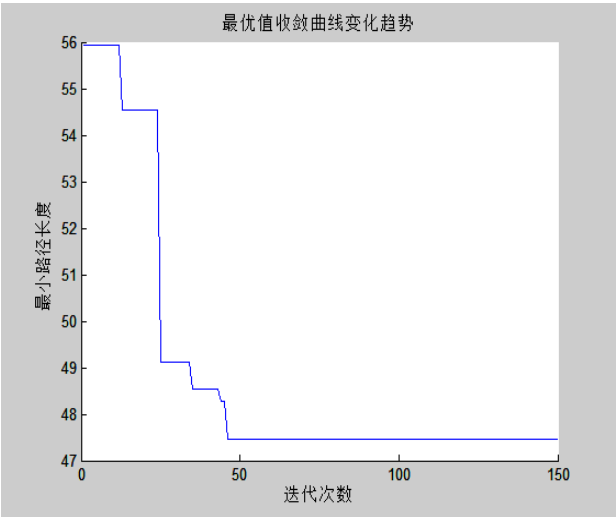
三、仿真结果

文中的仿真实验设置在 20×20 栅格以及 30×30 栅格的栅格环境下,栅格地图中白色栅格表示船舶的可行海域,黑色栅格表示船舶的不可行区域,即障碍物。将 20×20 地图下的栅格长度设为 1 n mile, 30×30 地图下栅格长度设为 $2/3$ n mile。在两种栅格环境下实验以验证所设计算法的有效性。

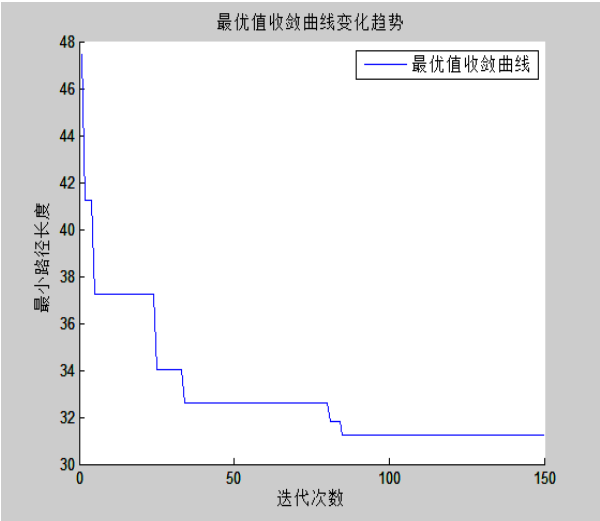
(1) 20×20 栅格环境地图仿真实验



(a) 改进蚁群算法的最优路径



(b) 改进蚁群算法的收敛曲线变化趋势

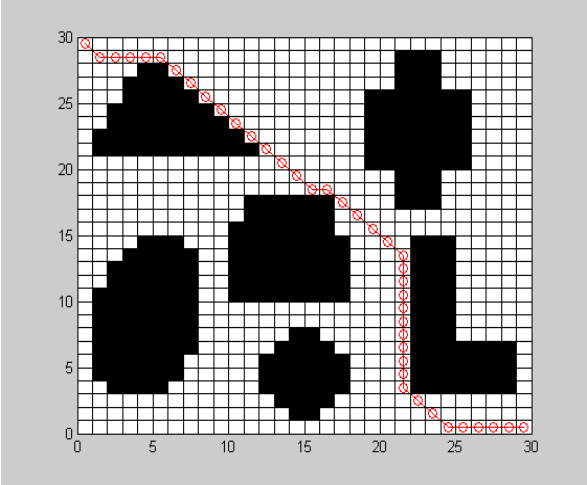


(b) 改进蚁群算法的收敛曲线变化趋势

图 1 20×20 栅格地图仿真实验结果

仿真结果所示，算法能够规划出一条安全避障且路径相对平滑的路径，最优路径长度为 31.2132n mile。

(2) 30*30 栅格地图环境下的仿真实验



(a) 改进蚁群算法的最优路径

图 2 30×30 栅格地图仿真实验结果

仿真实验结果所示，船舶同样可以规划出安全且路径相对平滑的路径，最优路径长度为 47.4558n mile，由于实际栅格长度为 2/3n mile，即最优路径长度为 31.6372n mile。

通过以上仿真实验，对实验结果进行讨论，具体实验数据如表 1 所示。

由实验结果可知，在两种分辨率栅格地图下所寻求路径结果相对稳定，最优路径长度结果相差无几，存在的差距是由不同地图栅格粒度所导致的，属于合理范围内。从两种栅格地图的实验结果图可以看出，所设计的势场蚁群算法能够规划出一条安全且平滑的最优路径，证明了算法的有效性。

四、结论

文中基于蚁群算法研究船舶自主避障路径规划，并通过栅格环境对文中所改进的蚁群算法进行仿真实验。仿真实验结果表明，借鉴人工势场法所改进的蚁群算法能够规划出一条安全且平滑的最优路径，证明了算法的有效性。

文中在仿真实验环境建模中将船舶看作一个质点，没有考虑真实的船舶尺寸，在后续的研究中，可以进行三维环境下建模仿真，对船舶在航行时各个角度加入更多约束条件，使仿真实验更加贴合船舶真实航行状态。

表 1 静态环境下的仿真实验结果

栅格分辨率	最优路径长度	最差路径长度	平均路径长度
20 × 20	31.2132n mile	47.4558n mile	32.9499n mile
30 × 30	31.6372n mile	37.2941n mile	32.5907n mile

参考文献

[1] 郑中义, 吴兆麟. 船舶碰撞危险度的新模型[J]. 大连海事大学学报, 2002, (2): 1-5.

[2] 李源惠, 潘明阳, 吴娴. 基于动态网格模型的航线自动生成算法[J]. 交通运输工程学报, 2007, (3): 34-39.

[3] Ki-Yin Chang, Jan Gene-Eu, Parberry Ian. A Method for Searching Optimal Routes with Collision Avoidance on Raster Charts[J]. Journal of Navigation, 2003, 56 (3): 371-384. (下转第 24 页)

“勇士号”重新起吊使沉船舱口围板露出水面，经过必要的抽水封堵之后，使沉船达到安全自浮状态，将沉船拖到船东和海事局指定位置进行交船。方案中选择的钢缆φ110、φ32。在进行沉船扳正作业钢缆布置时，其基本流程为：焊接扳正桩头——镶嵌钢丝——布置 4 寸牵引钢缆——牵引 13 寸扳正钢缆——切割透气帽或封堵透气孔——机舱和 3#货舱充气、船艏抬浮——预埋起浮牵引钢缆和“小辫子”——挂钩和连接扳正钢缆——清除障碍物——扳正沉船，基本流程如下。

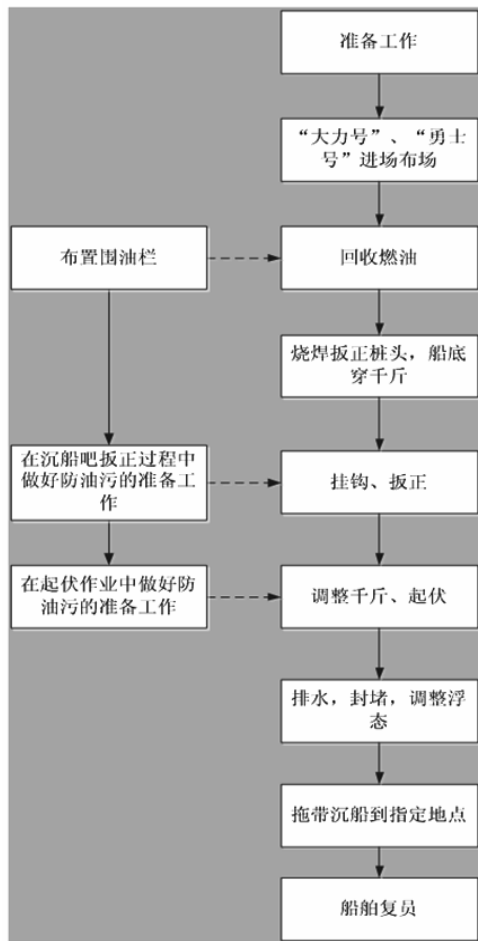


图 2 基本流程

在明确上述沉船扳正作业的基本方案以及所需钢缆的基本规格后。针对该钢缆作业，应用文中提出的评价模型对钢缆的安全性进行评价。利用文中上述论述内容，首先完成对

沉船扳正作业中钢缆的需求张力，并利用文中评价模型得出作业方案中各个规格钢缆的安全性评价结果，将得到的两组数据进行比较，并绘制成表 2 所示。

表 2 各规格钢缆安全性评价结果与需求张力对比

钢缆规格	需求张力 (kN)	实际钢缆张力 (kN)	钢缆安全评价指标	
			标	内
φ 110	50~60	53.3	0.98	是
φ 80	15~25	20	0.97	是
φ 48	5~15	10	0.98	是
φ 32	0~10	5.5	0.96	是
φ 12	0.5~1.5	1	0.98	是

从表 2 中得到的数据可以看出，各个规格下钢缆的实际张力均在需求张力范围内，通过文中评价模型得到的钢缆安全评价指标也均在 0.95 以上。因此，从得出的结果可以看出，针对这一沉船事故，采用上述作业方案具备极高的安全性，该作业方案可行。

三、结束语

现代化施工过程中，统筹是方法，管理是手段。为了顺利完成这次打捞任务，上海打捞局投入了大量的船舶、设备及人力资源。作业船舶由于受沉船状态和天气等各方面因素影响经常需要移位等作业。为了保证尽快地完成本次沉船救助打捞任务，现场经常会多个作业面同时施工。为了统筹安排打捞现场的船舶、设备及人员，在作业的过程中需要对与作业相关的各类材料、设备进行安全性评价，以此才能够确保作业的安全和有效。同时，在评价模型得出的结果基础上，能够实现对各类资源的充分利用，合理调整施工方法和步骤，逐步理顺施工现场各个环节，保证了施工进度。

参考文献

[1] 李军.《夏长》号沉船打捞过程中扳正驳船运动响应分析[J].广东造船, 2019, 38(6): 30-33.

[2] 王金龙, 孙继刚, 段明昕. "振和 168" 轮救助打捞工程难船扳正分析[J]. 广东科技, 2015, 24(14): 112-114.

[3] 潘德位, 林成新, 孙德平等. 大倾角搁浅船舶扳正过程分析[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(2): 50-58.

[4] 吴建成. 沉船扳正封尾力计算[J]. 船海工程, 2020, 49(1): 27-29.

[5] 黄利琼, 王立, 刘海. 基于模糊层次综合评价法的疫情影响下高处作业安全管理体系评估[J]. 石油化工建设, 2022, 44(1): 50-53.

(上接第 21 页)

[4] Rafał Szlapczynski. A New Method of Ship Routing on Raster Grids, with Turn Penalties and Collision Avoidance[J]. Journal of Navigation, 2006, 59(1): 27-42.

[5] 孟祥杜. 无人船路径规划算法研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2017.

[6] 陈佳. 无人驾驶救助船路径规划算法的研究[D]. 武汉: 武

汉理工大学, 2013.

[7] 刘琨, 张永辉, 任佳. 基于改进人工势场法的无人船路径规划算法[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2016, 34(2): 99-104.

[8] 张文拴. 基于改进势场蚁群算法的无人船路径规划研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.