

基于蚁群算法的多 AUV 路径规划仿真研究

吴小平, 冯正平, 朱继懋

(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030)

摘要: 多 AUV 路径规划是一种典型的带约束组合优化问题, 如果采用传统的方法求解效果并不理想。蚁群算法是对自然界中蚂蚁在寻找食物过程中所表现出来的智能行为的一种模拟, 它非常善于处理带约束的大规模复杂组合优化问题。应用蚁群算法结合 TSP 问题来为一群 AUV 进行路径规划, 寻找最短且安全的路径。算法分为两部分: 1) 路径优化: 使所有 AUV 的总路程最小化; 2) 路径校核: 检查是否存在潜在的静态或动态碰撞。最后以三个 AUV 的情形为例对算法加以验证, 仿真结果表明该方法耗时短、效率高, 为求解多 AUV 路径规划问题提供了一个高效解决方案。

关键词: 蚁群算法, 多自治水下机器人, 旅行商问题, 路径规划

中图分类号: TP301.6; TP24 **文献标识码:** A

Simulation of Path Planning of Multiple Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) Based on Ant Colony Algorithm

WU Xiao-ping FENG Zheng-ping ZHU Ji-mao

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

ABSTRACT: Path planning of multiple AUVs is a typical constrained combinational optimization problem which is difficult to tackle with conventional methods. Ant colony algorithm, which is simulation of intelligent behavior exhibited by real ant colonies during their food hunting, provides an efficient way for large-scale complicated combination optimization subject to nonlinear constraints. In this paper, ant colony algorithm is combined with TSP to find economical and safe routes for a swarm of AUVs. The algorithm can be divided into two phases: 1) route optimization, minimizing the total journey of the vehicles and 2) route validation, checking whether there exist stationary and/or moving collisions. A case study for three AUVs to survey a given area is also presented and the simulation results show that the proposed algorithm provides an efficient and timesaving way for path planning of multiple AUVs.

KEYWORDS: Ant colony algorithm; Multiple AUVs; Traveling salesman problem (TSP); Path planning

1 引言

自治水下机器人 (autonomous underwater vehicle, 简称 AUV) 是一种能携带多种传感器、专用设备或武器的水下智能化装置。它自带能源, 不受脐带缆的牵制, 可以在大范围海域自主航行, 在海洋搜索、海洋考察以及军事上有着良好的应用前景。

由于 AUV 在作业时完全自主, 所以为了完成这些任务, 在未知的海底环境中规划出一条安全高效的路径对于 AUV 来说至关重要。关于 AUV 路径规划的算法有很多, 如: 人工势场法^[1]、基于案例法^[2]、图形搜索法^[3]等, 然而, 这些方法却并不一定适用于多 AUV 路径规划, 因为多 AUV 路径规划要涉及到更多的避碰问题。文献 [4] 提出了一种用于多

AUV 路径规划的高效算法, 该算法主要用于解决路径点的重要访问问题, 利用多个 AUV 对某一区域内的路径点进行确认调查, 然而该文献只考虑了路径优化而忽略了避碰。与文献 [4] 相比, 本文所考虑的是更为一般的情况, 具体说来就是:

1) 这块区域存在静态障碍物, 于是要考虑静态避碰问题;

2) 多个 AUV 的路径有可能发生交叉的情况, 于是要考虑 AUV 间的动态避碰。

本文采用的是善于处理大规模组合优化问题的蚁群算法, 算法中的转移概率和启发信息指引优化过程朝着最短路径方向进行。除了优化, 本文还重点考虑了其他方法所没有考虑的避碰问题, 为 AUV 的安全提供了保障。

2 问题描述

假定在某次海洋调查任务中, 科学家已经通过其它方式

例如母船上的声纳系统)对某片海域进行了粗略的调查,调查结果发现了一些有价值的目标点(比如水雷),称之为路径点 (waypoint),同时还发现了一些礁石之类的障碍物,称之为静态障碍点。将路径点和静态障碍点的数量分别记为 n 和 q 。本文所要做的工作就是安排若干个 (记为 m) AUV 来对这些路径点进行确认调查。图 1 为多 AUV 在有障碍物的海域里开展路径点重访的示意图。图中 S_i 、 E_i ($i=1, 2, \dots, m$) 分别表示第 i 个 AUV 的起点和终点。 P_i ($i=1, 2, \dots, n$) 表示待访问的路径点, O_i ($i=1, 2, \dots, q$) 表示静态障碍物,如沉船、暗礁等,其影响半径记为 R_i , 称以 O_i 为圆心、 R_i 为半径的圆为危险圆, AUV 不能进入危险圆内,否则就有可能发生危险。多 AUV 重访调查的目标就是要对这片海域的路径点逐一进行确认调查。调查目标要求每个路径点都要被访问到, AUV 不仅不能与静态障碍物发生碰撞,而且各 AUV 之间也不能发生相互碰撞,以保障作业的安全。在这些基本前提下,要保证整个 AUV 团队所航行的路程最短以节省能量,从而延长水下作业的时间。

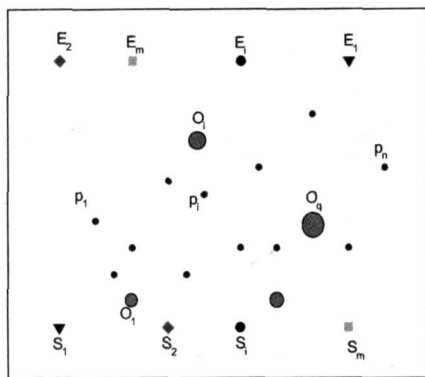


图 1 多 AUV 重访示意图

3 基于蚁群算法的多 AUV 路径规划

受到自然界中蚂蚁寻找食物这一自然现象的启发,意大利学者 Dorigo 首次提出了蚁群算法,该算法通过模拟蚂蚁社会分工与协作的原理来进行寻优^[5]。蚁群算法虽问世不久,但它已为很多专家所接受并陆续被运用到很多领域尤其是大规模组合优化问题等方面,表现了良好的性能。这是因为,随着问题规模的逐渐增大,许多组合优化问题其搜索空间中可行解的数量会以指数式增长。而蚁群算法作为一种启发式搜索策略,可以通过引入启发信息 (信息素) 使优化过程朝着最优的方向进行,最终找到问题的最优解。由于多 AUV 协调路径规划实质上是一种带约束的组合优化问题,所以,本文提出了基于蚁群算法的多 AUV 协调路径规划,该算法由路径优化和路径校核两部分组成。

3.1 路径优化

在路径优化之前,首先要对各 AUV 所要访问路径点的数量进行分配。为了保证各 AUV 之间的任务量不致相差太大,所以路径点的分配应尽可能均匀。分配过程只负责 AUV

所分配的路径点的数量,而各路径点被访问的先后顺序则由蚁群算法来实现。依次连接某一 AUV 的起点、被分配的路径点以及其终点,就形成了该 AUV 的路径。对所有的 AUV 执行同样的操作,就生成了多 AUV 的路径。若路径点数量 n 恰好能被 AUV 数量 m 整除,则每个 AUV 将分配有 n/m 个路径点;若 n 不能被 m 整除,那么将余数再自首至尾逐一分配给每个 AUV,直到分配完为止。路径的长度可以通过计算路径中所有相邻两路径点 (包括各 AUV 起点和终点) 之间距离来求得,将各 AUV 的路径长度进行求和,即可得到多 AUV 的路程。

经过上一过程的分配,每个 AUV 所要访问的路径点数量已经明确,记第 i 个 AUV 即 AUV# i ($i=1, 2, \dots, m$) 所分配的路径点数量为 n_i , 则

$$\sum_{i=1}^m n_i = n \quad (1)$$

接下来就要确定具体的路径点及访问顺序。对于任意 AUV, 其任务就是自起点出发经过若干个路径点 (且每一路径点只能经过一次) 最终回到终点,这与 TSP 问题非常相似,所以 AUV 的路径规划就可以转化为类似的 TSP 问题 (Traveling Salesman Problem, 简称 TSP)。TSP 是数学领域中著名的问题之一,其定义为:一个旅行商要拜访多个城市,他必须选择所要走的路径,条件是每个城市只能拜访一次且最后要回到原来出发的城市。路径选择的目标是所选择路径的路程必须是所有路径之中的最小值。本文中的问题与 TSP 区别在于: 1) AUV 在航行过程中受到环境的约束 (要与障碍物保持一定距离); 2) TSP 问题只相当于单个 AUV 的路径规划,本文中的多 AUV 路径规划还要协调好各 AUV 之间的关系。所以本文中的问题可转化为带约束的 TSP 问题。

假定蚂蚁数量为 b , d_{ij} ($1 \leq i \leq n+2m, 1 \leq j \leq n+2m, i \neq j$) 表示点 i 和点 j 之间的距离,由于 m 个 AUV 各有起点和终点,再加上 n 个路径点,所以一共有 $n+2m$ 个需要访问的点。 τ_{ij} (τ 表示 t 时刻残留在点 i 和点 j 之间的信息素浓度大小 (信息量))。信息素浓度将直接影响到蚂蚁对下一时刻路径的选择,信息素浓度越大,则此路径被选择的概率也就越大,算法步骤如下:

- 1) 初始化。在初始时刻 $t=0$ 时,赋予各条路径相同的信息素浓度,即 $\tau_{ij}(0) = c$ 其中 c 为常数;
- 2) 将蚂蚁 k ($k=1, 2, \dots, b$) 置于 AUV# i 的起点;
- 3) 构造解。在 t 时刻,蚂蚁 k 将根据某一转移概率来选择其中一个路径点作为移动目标,转移概率 p_{ij}^k (τ 表示 t 时刻蚂蚁 k 由点 i 转移到点 j 的概率,表示如下:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} (\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta) / \sum_{l \in \text{allowed}_k} \tau_{il}^\alpha(t) \eta_{il}^\beta, & j \in \text{allowed}_k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

其中: η_{ij} 为由点 i 转移到点 j 的启发信息,定义:

$$\eta_{ij} = 1/d_{ij} \quad (3)$$

这表明两点间距离越小,则转移概率越大。 α 、 β 为常数,

分别表示信息素浓度和启发信息对决策影响的程度, $allowed_k$ 为蚂蚁 k 下一步允许选择的路径点的集合。

4) 当蚂蚁 k 完成 n_i 个路径点后的访问后 (AUV#1 所分配的路径点数量为 n_i), 回到 AUV#1 的终点, 计算路程并记录路径, 同时将经过的 n_i 个路径点添加到禁忌表中 (禁忌表的作用是为了表明这些路径点已经被访问过, 无需再次访问)。然后将蚂蚁 k 置于 AUV#2 的起点, 继续搜索 AUV#2 的路径, 直到生成所有 AUV 的路径。

5) 当所有蚂蚁完成路径点 (包括 AUV 的起点和终点) 的访问后, 按照下面的公式对各条路径上的信息素浓度进行更新:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^b \Delta\tau_{ij}^k(t) \tag{4}$$

其中 ρ ($0 < \rho < 1$) 为信息素挥发系数, 表示随着时间增加, 信息素会因为挥发而逐渐减少。 $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ 表示在本次途中蚂蚁 k 在路径 ij 上留下的信息量, 当蚂蚁 k 经过 ij 这一路径时, $\Delta\tau_{ij}^k(t) = Q/L_k$, 其中 Q 为正常数, L_k 为蚂蚁此次所选择的路径的总长度; 当蚂蚁 k 没有经过 ij 这一路径时, 则 $\Delta\tau_{ij}^k(t) = 0$ 。

6) 重复步骤 2) ~ 5), 直到满足设定的迭代次数。

3.2 路径校核

经过前面的步骤, 可以找到最短路径。由于有障碍物且 AUV 之间的路径有可能会发生交叉, 所以该路径不一定是安全的, 所以还要进行路径安全校核。定义 AUV 与静态障碍物发生的碰撞为静态碰撞, AUV 与 AUV 之间发生的碰撞为动态碰撞, 相应的避碰行为分别称之为静态避碰和动态避碰。

3.2.1 静态避碰

为了避免发生静态碰撞, 可以将与障碍物过近路径上的信息素浓度设为负数从而让蚁群不走此路径。首先定义一个安全距离, 当 AUV 到危险圆圆心的距离小于危险圆半径与安全距离之和, 则认为 AUV 会发生静态碰撞。将某条路径上距离危险圆 (障碍物) O_i 最近的一条线段记为 P_kP_j , 那么, 只要满足下式, 就可以避免静态碰撞的发生:

$$d_i = \frac{|A \cdot x_{oi} + B \cdot y_{oi} + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} > R_i + d_{safe} \tag{5}$$

$A = y_{pj} - y_{pk}$, $B = x_{pk} - x_{pj}$, $C = x_{pj}y_{pk} - y_{pj}x_{pk}$ (6)
其中: $[x_{oi}, y_{oi}]$ 为 O_i 的圆心坐标, R_i 为 O_i 的半径, d_{safe} 为预先已知的安全距离, $[x_{pk}, y_{pk}]$ 和 $[x_{pj}, y_{pj}]$ 分别为路径点 P_k 和 P_j 的坐标。

3.2.2 动态避碰

当任意两个 AUV 的路径发生了交叉, 那么它们在航行中就有可能发生动态碰撞。动态避碰最有效的方法就是设法让具有交叉路径的两个 AUV 以一个时间差陆续通过交叉点, 以确保安全。通过计算 AUV 到达交叉点所需要的时间, 如果时间差大于预先设定的安全时间, 那么就可以避免动态碰撞的发生, 动态避碰由下式描述:

$$|t_i - t_j| > t_{safe-ij} \tag{7}$$

其中: $t_{safe-ij}$ 为 AUV# i 与 AUV# j 之间的安全时间, 也就是说, 当这两个 AUV 经过他们路径交叉点的时间差大于这一安全时间时, 它们不至于发生碰撞。反之, 则有可能发生碰撞, 于是将该路径上的信息素浓度设为负数, 重新运行算法寻找其他路径, 直到找到安全路径为止。 t_i 和 t_j 分别为 AUV# i 和 AUV# j 从起点出发到达交叉点所用的航行时间。航行时间取决于路径的长度和 AUV 的速度。假定 AUV 都以它们的巡航速度航行, 那么到交叉点所需的航行时间可以由下式计算:

$$t_i = \frac{L_{SM}^i}{v_i}, t_j = \frac{L_{SM}^j}{v_j} \tag{8}$$

其中: L_{SM}^i 和 L_{SM}^j 分别为 AUV# i 和 AUV# j 沿着各自的路径从出发点 to 交叉点的路程, v_i 和 v_j 为各自的巡航速度。

4 仿真分析

本例包括 3 个 AUV ($m=3$), 2 个障碍物 ($q=2$), 12 个路径点 ($n=12$), 其位置坐标见表 1, 两个障碍物所形成的危险圆半径分别为 $R_1=20m$ 和 $R_2=30m$, 静态避碰的安全距离 $d_{safe}=20m$, 动态避碰的安全时间 $t_{safe-12}=t_{safe-13}=t_{safe-23}=20s$ 各 AUV 的巡航速度均为 3 节 ($v_1=v_2=v_3=1.54m/s$)。

表 1 各关键点的坐标值 (AUV 起点、AUV 终点、路径点、障碍物等)

	S1	E1	S2	E2	S3	E3	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	O1	O2
x (km)	0	8	5	5	8	2	1	1.5	2	3	3.5	4	5	5.5	6	7	8	9	3	8
y (km)	0	10	0	10	0	10	4	2	3	5.5	2	5	3	6	3	8	3	6	7	3

蚁群算法参数设置为: $b=20$, $\rho=0.2$, $\alpha=1$, $\beta=2$, $Q=100$, 在上述参数下经过 10 次迭代, 历时 1.45 秒 (CPU time), 算法求解得到的各 AUV 路径及总路程如下:

$$\begin{aligned} S_1 &=> P_2=> P_3=> P_1=> P_4=> E_1; \\ S_2 &=> P_5=> P_7=> P_6=> P_8=> E_2; \\ S_3 &=> P_9=> P_{11}=> P_{12}=> P_{10}=> E_3 \end{aligned}$$

总路程 $L=43.61$ (km), 路径如图 2 所示。

以障碍物 O_1 和 AUV#1 为例来说明静态避碰。AUV#1 的路径中与 O_1 最近的线段为 P_4E_1 , O_1 到线段 P_4E_1 的距离为 $d_i=580m$, 大于危险圆半径与预设安全距离之和, 即 $d_i > R_1 + d_{safe}$ 。由此可知, AUV#1 不会与障碍物 O_1 发生碰撞。静态避碰的结果见表 2, 从表中可以看出, 其它的 AUV 也不会发生静态碰撞。

表 2 静态避碰校核

	O1	O2
d_i (m)	580	800
R_i (m)	20	30
d_{safe} (m)	20	20
Stat. collision validation	safe	safe

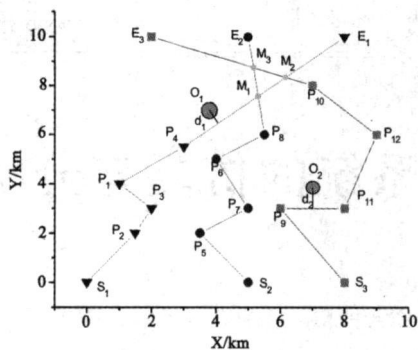


图 2 蚁群算法求得的最优路径

动态避碰校核见表 3,表中列出了各 AUV 到达交叉点所用的时间,以及具有交叉路径的两 AUV 到达交叉点的时间差。从表中可以看出,任意 2 个 AUV 的时间差都要比安全时间大,所以尽管 AUV 的路径会两两交叉,但是它们并不会同时到达交叉点,而是以一定的时间差先后经过交叉点,所以并不会发生动态碰撞。

表 3 动态避碰校核

	Time to M ₁ (s)	Time to M ₂ (s)	Time to M ₃ (s)
AUV#1	6889	7631	
AUV#2	6433		7193
AUV#3		8105	8800
Time difference	456	474	1607
t _{safe}	20	20	20
Mov. colli validation	safe	safe	safe

5 结论

多 AUV 路径规划是多 AUV 系统中的一大难点,目前对该领域的研究还非常有限。本文基于蚁群算法对多 AUV 协调路径规划问题进行了研究,首先对各 AUV 的路径点数量

进行分配,然后将多 AUV 路径规划问题转化为带约束的 TSP 问题,并用蚁群算法对其进行优化;由于存在静态障碍物且任意两个 AUV 的路径有可能会交叉进而有潜在碰撞的危险,所以算法还考虑了动态和静态避碰验证以保证路径的安全。最后本文以一个具体例子对算法进行了验证。结果表明,蚁群算法结合静态避碰和动态避碰的路径规划算法,不仅计算速度快,而且所得到的路径既短又安全,成功解决了多 AUV 路径规划问题。

参考文献:

- [1] C W Warren. A technique for autonomous underwater vehicle route planning [C]. Proceedings of the Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, 1990.
- [2] C Vasudevan and K Ganesan. Case-based path planning for autonomous underwater vehicles [C]. IEEE International Symposium on Intelligent Control - Proceedings, 1994.
- [3] E Rippe, A Bar-Gill and N Shimkin. Fast graph-search algorithms for general aviation flight trajectory generation [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2005, 28 (4): 801-811.
- [4] J R Stack, C M Smith and J C Hyland. Efficient reacquisition path planning for multiple autonomous underwater vehicles [C]. Ocean '04 - MTS/IEEE Techno-Ocean '04: Bridges across the Oceans, 2004.
- [5] M Dorigo, et al. Guest editorial: Special section on ant colony optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6 (4): 317-320.

作者简介



吴小平 (1979-), 男 (汉族), 湖北黄冈人, 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院博士研究生, 研究方向为水下机器人操纵与控制;

冯正平 (1966-), 男 (汉族), 江苏盐城人, 上海交通大学水下工程研究所副教授, 研究方向为水下机

器人操纵与控制;

朱继懋 (1937-), 男 (汉族), 浙江绍兴人, 上海交通大学水下工程研究所教授, 博导, 研究方向为水下机器人操纵与控制。

(上接第 128 页)

- [3] 王荣, 郑继禹, 林基明. MB-OFDM 系统中基于导频的信道估计 [J]. 桂林电子工业学院学报, Jun, 2005, 25 (3): 1-5.
- [4] A Batra, J Balakrishnan, G R Aiello, J R Foerster and Dabak. Design of a multiband OFDM system for realistic UWB channel environments [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, IEEE, Sept 2004, 52 (9): 2123-2137.
- [5] Fan Xiang-ning, Leng Bing and Bi Guang-guo. An improved channel estimation algorithm for OFDM-UWB [C]. International conference on wireless communication, networking and mobile computing 2005, proceedings, 2005.
- [6] Takehiro Higashi, Eikichi Taira, Shigenori K. Injo and Hiroshi Ochi

Performance evaluation of MBOA UWB system under a multipath Channel [C]. The 7th International conference on advanced communication technology, 2005.



作者简介

叶凌敏 (1983.1.25-), 男 (汉族), 浙江省江山人, 硕士研究生, 主要研究方向是无线通信和个人通信;

仇洪冰 (1963-), 男 (汉族), 江苏如皋人, 教授, 主要研究方向是扩频通信和超宽带通信。