

基于 Bug2 和角度优先的多 AUV 围捕策略

陈世健 陈宏 丁贺 范智艺 巩伟杰

(深圳大学机电与控制工程学院, 广东 深圳 518060)

摘要: 水下围捕活动是多自主水下机器人研究的重点和难点。由于水下光照不足和水流波动影响, 导致周遭环境变化不定, 环境地图识别困难。为此, 提出基于 Bug2 和角度优先的多 AUV 围捕策略。利用 Bug2 算法实现路径规划, 通过自主水下机器人的传感器获取周遭环境信息, 实现最短直线游动或紧贴障碍的沿边游动; 采用角度优先的围捕策略解决猎物逃离问题, 其以自身速度为参考, 设置一定角度来保证及时封堵猎物的逃离路线。经仿真验证: 此算法完成了有/无障碍下的围捕, 并分析了其围捕效率的影响因素。

关键词: 自主水下机器人; Bug2 算法; 角度优先

中图分类号: TP15

文献标识码: A

文章编号: 1674-2605(2021)01-0004-04

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2021.01.004

0 引言

自主水下机器人 (autonomous underwater vehicle, AUV) 是海洋资源探测开发及海底作业的有力助手。目前, 单体 AUV 的研究已比较成熟。随着对海洋探索的力度逐渐加大, 单体 AUV 已无法满足需求, 多 AUV 系统已成为当今水下技术研究的重要方向^[1-2]。

多机器人围捕行为的研究思路来源于大自然狼群、老虎、食人鱼等动物的群体捕猎。多机器人围捕的关键在于它们之间任务的分配及配合, 其协作策略影响围捕效率。王巍等^[3]采用“虚拟范围”作基准, 降低动态规划次数, 从而提高围捕效率。林子健等^[4]提出基于平行导引律的多智能体编队围捕, 减少路径冗余, 缩短围捕时间。陈世明等^[5]使用拓扑结构的分布式算法, 降低协作机器人间的轨迹偏差。祝超超^[6]根据人工力矩方法的特点, 自组织完成单个或多个目标点的围捕。以上文献都对目标猎物的逃离策略做了一定简化, 如假设目标猎物静止或降低目标猎物速度等, 但未考虑目标猎物可能的逃离路线。

海洋环境地势易受海流影响, 为减少环境探测更新和路径规划的复杂度, 本文路径规划采用 Bug2 算法, 降低水下 AUV 计算率, 加快 AUV 反应时间。为防止猎物逃离, 采用角度优先的围捕策略, 使多 AUV 均匀地分散猎物周边, 对猎物特定角度的逃离路线进

行及时封堵。

1 Bug2 算法

Bug0 算法由 LUMELSKY 等^[7]提出, 后来 KAMMON 等^[8]在此基础上改进为 Bug1 和 Bug2 算法。它们共同的思想就是机器人朝目标做直线运动或绕障碍物的靠边运动, 以移动到目的地。

Bug2 算法先确定起点与终点的主线, 在未碰到障碍物时沿主线运动; 碰到障碍物时, 先沿障碍物的边廓移动, 直到再次回到主线继续沿主线移动, 如图 1 所示。

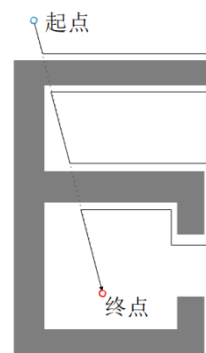


图 1 Bug2 算法原理

2 角度优先的围捕策略

本文围捕使用的机器人为 4 个 AUV, 待围捕目标 (猎物) 为 1 个。一般围捕方法是 4 个 AUV 以猎

物为中心点,找准自身的定位形成包围网,如图2所示。

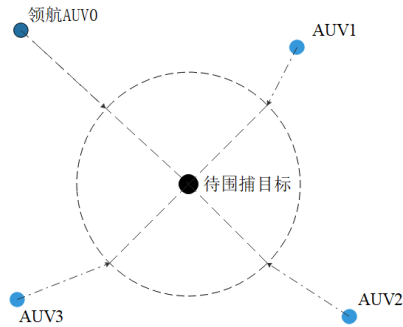


图2 围捕示意图

猎物一般不会坐以待毙,感受到危机后会迅速逃离包围圈。本文采用角度优先围捕策略防止猎物逃离,示意图如图3所示。

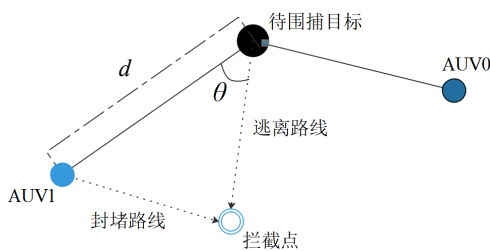


图3 角度优先围捕策略示意图

图3中, d 为AUV1与猎物的距离; θ 代表AUV1对猎物逃离角度的可控范围,即猎物在这个范围的逃离路线,AUV1可及时到达拦截点进行封堵,防止猎物逃离包围圈。

由余弦定理,可得

$$d^2 + (v_g t)^2 - (v_i t)^2 = 2dv_g t \cos \theta \quad (1)$$

式中, v_g 为猎物速度; v_i 为AUV速度;令 $\lambda = v_g / v_i$ 为猎物和AUV1的速度比,代入式(1),可得

$$(\lambda^2 - 1)v_i^2 t^2 - 2\lambda dv_i t \cos \theta + d^2 = 0 \quad (2)$$

由式(2)可知,AUV1成功封堵猎物逃离路线,即及时到达拦截点的必要条件为

$$\lambda \sin \theta \leq 1 \quad (3)$$

因此,设定 θ 值,只要速度比 $\lambda \leq 1/\sin \theta$ 就可以封

锁猎物逃离路线,形成包围圈。

多AUV围捕的关键是围捕包围圈形成。首先,需要领航AUV0确定以猎物为中心的十字线;然后,AUV0通知AUV1,AUV2,AUV3在十字线上寻找满足 $\lambda \sin \theta \leq 1$ 的近点并移动过去,如图4所示。

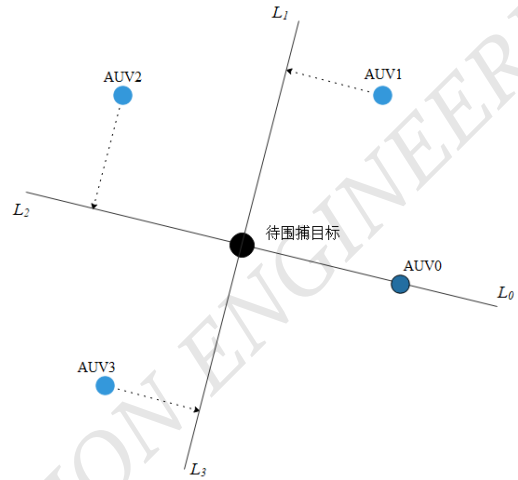


图4 包围圈的形成

当各AUV都在十字线上形成包围圈后,开始逐渐缩小围捕包围圈,步步逼近猎物进行围捕,围捕成功示意图如图5所示。

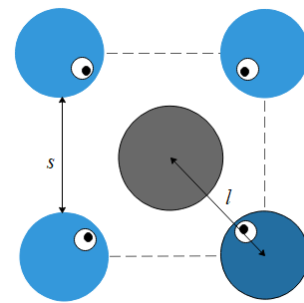


图5 围捕成功示意图

设 r 为猎物半径; s 为相邻AUV间距,则围捕成功的条件为 $s \leq 2r$ 。因此,只要所有AUV与猎物的距离 $l \leq 1.4142r$ 时,围捕结束。

3 仿真实验

本文采用Java的GUI平台进行仿真实验,有4个围捕AUV和1个猎物,规定围捕时间为20s,超过20s代表围捕失败;同时设定在有/无障碍物情境

下围捕，以便对比。

3.1 无障碍物围捕

无障碍物围捕过程如图 6、图 7 所示。其中，分布四周的浅灰色点表示围捕 AUV，黑色点代表猎物。

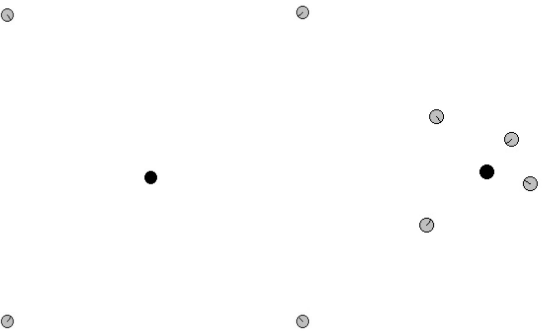


图 6 无障碍物围捕接近猎物 图 7 无障碍物围捕开始

图 6 中，4 个 AUV 首先形成大包围，从 4 个角落点出发前往猎物。图 7 中，AUV 展开围捕，并利用角度优先围捕策略封堵猎物逃离路线。

当满足条件 $l \leq 1.4142r$ 时，表示围捕成功，如图 8 所示。其中，虚线表示 AUV 和猎物的行动轨迹。

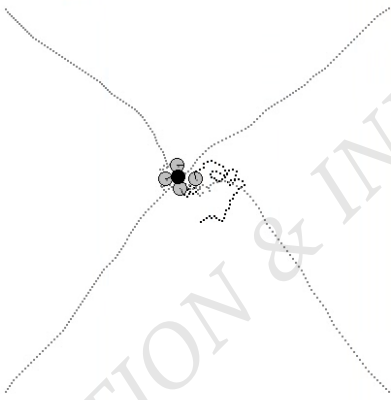


图 8 无障碍物围捕结果

无障碍物围捕时，不同速度比的围捕结果如表 1 所示。

表 1 无障碍物围捕不同速度比的围捕结果

速度比 λ	围捕成功率 /%	围捕成功时平均消耗时间 /s
0.5:1	100	3.846
1:1	98	5.416
1.5:1	76	11.438

由表 1 可知：无障碍物情况下，随着速度比 λ 增加，围捕成功率递减；同时，相应的平均围捕时间增长。

3.2 有障碍物围捕

有障碍物围捕过程如图 9、图 10 所示，其中，分布四周的浅灰色点表示围捕 AUV，黑色点代表猎物，深灰色点表示障碍物。

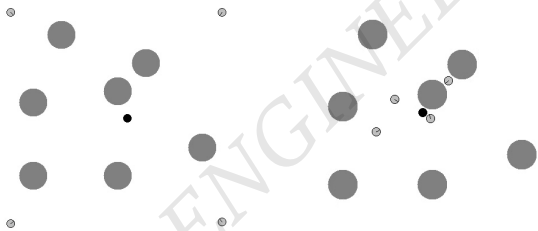


图 9 有障碍物围捕接近猎物 图 10 有障碍物围捕开始

图 9 中，4 个 AUV 先形成大包围，再从 4 个角落点出发前往猎物，并通过 Bug2 算法避开障碍物规划路线到达自己目标位置。图 10 中，AUV 展开围捕，利用角度优先围捕策略封堵猎物逃离路线。

当满足条件 $l \leq 1.4142r$ 时，围捕成功，如图 11 所示，其中，虚线表示 AUV 和猎物的行动轨迹。

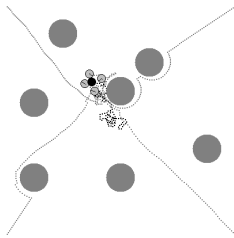


图 11 有障碍物围捕结果

有障碍物围捕时，不同速度比的围捕结果如表 2 所示。

表 2 有障碍物围捕不同速度比围捕结果

速度比 λ	围捕成功率 /%	围捕成功时平均消耗时间 /s
0.5:1	100	5.567
1:1	96	9.249
1.5:1	66	15.746

由表 2 可知：有障碍物情况下，随着速度比 λ 增

加, 围捕成功率递减; 同时, 相应的平均围捕时间增长。

3.3 仿真实验结果分析

结合表 1、表 2 可知: 不同速度比, 围捕成功率和平均围捕时间存在明显差别。在猎物与 AUV 的速度比 $\lambda \leq 1$ 时, 围捕成功率近似 100%; 但 $\lambda > 1$ 时, 围捕成功率开始下降, 且随着 λ 增大, 围捕行动愈发困难且平均围捕时间也更多。

有/无障碍物围捕时, 成功率和平均围捕时间也有所差别。相对于无障碍物场景, 有障碍物场景 AUV 的围捕效率及成功率都有所降低。

本次实验将 Bug2 算法与角度优先的围捕策略相结合, 在有限的时间内, AUV 完成围捕任务, 证明本文设计的可行性和实用性。

4 结语

本文将 Bug2 算法和角度优先围捕策略相结合, 解决有/无障碍物下多 AUV 的围捕问题, 并验证其可行性。但本文研究仅限于二维平面, 后续将扩展到三维空间; 同时, 本文假设猎物逃离策略为随机逃离,

没有考虑猎物存在智能的情况, 逃离策略的深入研究也是今后探讨的课题。

参考文献

- [1] 陈阳舟, 黄旭, 代桂平. 基于新的状态划分的多机器人围捕策略[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(8): 1031-1036.
- [2] 苏治宝, 陆际联, 童亮. 一种多移动机器人协作围捕策略[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(5): 26-29.
- [3] 王巍, 宗光华. 基于“虚拟范围”的多机器人围捕算法[J]. 航空学报, 2007(5): 403-406, 415.
- [4] 林子键, 王秋阳, 肖杨. 多机器人编队围捕算法研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(4): 350-355.
- [5] 陈世明, 耿书恒, 化俞新, 等. 基于拓扑结构的分布式围捕控制算法[C]//第 27 届中国控制与决策会议论文集(下册), 青岛: 出版社不详, 2015: 2908-2912.
- [6] 祝超超. 多机器人围捕的人工力矩法研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2016.
- [7] LUMELSKY V, STEPANO V. Dynamic path planning for a mobile automaton with limited information on the environment[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1986, 31(11): 1058-1063.
- [8] KAMON I, RIVLIN E. Sensory-based motion planning with global proofs[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1997, 13(6): 814-82(2).

Multiple AUV Capture Strategy Based on BUG2 and Angle Priority

Chen Shijian Chen Hong Ding He Fan zhiyi Gong Weijie

(School of Mechanical and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: Underwater roundup has always been the key and difficult point in the research of underwater multi-autonomous robot, and due to the lack of light under the sea and the influence of water flow fluctuation, it is easy to cause the difficulty of environmental map identification and the uncertainty of the surrounding environment. In view of these difficulties, this paper will adopt the simplest and most efficient Bug2 algorithm to realize path planning. It can use AUV's sensors, such as sonar, to obtain environmental information and realize the shortest straight line swim straight to the goal or the edge swim close to the obstacle. As for the problem of rounding up, it mainly solves the problem of target escaping in the round up, and the principle of angle priority can effectively prevent this kind of problem. It takes its own speed as a reference and sets a certain angle to ensure that the escape route of the target can be blocked in time, so as to achieve successful roundup. Finally, the Java platform simulation is used to verify the feasibility of the algorithm, and the experimental results are given.

Key words: AUV; Bug2 algorithm; angle priority

作者简介:

陈世健, 男, 1995 年生, 研究生, 主要研究方向: 水下机器海豚. E-mail: 15815127500@163.com

陈宏(通信作者), 男, 1971 年生, 副教授, 主要研究方向: 水下机器人系统. E-mail: chen hong@szu.edu.cn