

基于海图环境的无人艇全局路径规划

马欣¹, 杨兵¹, 邱斌彬², 王胜正¹, 赵建森¹

(1. 上海海事大学商船学院, 上海 201306; 2. 中远海运集装箱运输有限公司, 上海 200080)

摘要: 无人艇作为一种性能高、体型小、能够执行各种危险任务的水上智能移动平台备受各国关注。本文在考虑无人艇的航行水深环境及其运动性能的基础上对无人艇全局路径规划展开研究, 提出一种多约束的路径规划方法。首先基于 Voronoi Field 算法的原理构建安全距离约束模型, 利用安全距离约束模型对 A-star 算法进行改进, 保证全局路径与障碍物之间存在可控的安全距离。在此基础上, 对规划路径提出一种减少转折点及冗余节点的路径平滑优化方法。实验证明改进后的 A-star 算法规划出的航行路径能够与障碍物保持可控的安全距离, 平滑优化后的路径在路径长度、平滑度和节点数上较优化前其优势明显。

关键词: 电子海图; 无人艇; 路径规划

中图分类号: U664.82

文献标识码: A

文章编号: 1006—7973 (2022) 08—0041—03

近年来, 由于全球气候变暖、陆地资源紧缺、环境污染日益加剧, 世界各国对海洋资源的开发更加重视, 也因此带动了水面无人艇 (Unmanned Surface Vehicle, USV) 和水下机器人等海上高端设备的快速发展^[1]。作为一种海上智能机器人, USV 能够在无人干预的状况下独立执行任务, 是一种具有体积小、高速智能、隐蔽性强等优点的水面作业任务平台, 主要被用于执行具有危险性以及不适合有人船舶执行的任务^[2-3]。无人艇在环境监测、水文探测、近海巡逻、海上搜寻救助、远程侦察等民用及军事领域中都发挥了重大的作用^[4]。

Singh^[5] 等使用可以设置安全距离的 A* 算法在卫星图上生成了一条沿岸的安全路径, 该方法更适用于近岸航行。Candeloro^[6] 等利用维诺图 (Voronoi Diagram, VD) 方法对新加坡海峡的航行空间进行分割, 分割边界上的路径是环境中最安全的路径, 但利用费马螺旋线方法平滑后的路径与初始规划路径偏差较大。Niu^[7] 等利用维诺图算法和 Dijkstra 算法进行全局路径搜索, 在重构的新加坡海峡环境下得到了一条距离所有障碍物最远的路径但却不够平滑。Zhang^[8] 等将遗传算法和模拟退火法混合, 在栅格化的海图环境上进行了实验, 解决了传统遗传算法搜索能力不足和时间消耗问题。以上研究虽然考虑了路径的安全性, 但对实验环境中障碍物的建模以及路径的经济性考虑不足。

为了无人艇在自主航行过程中能够规划出一条安全、经济的路径, 本文通过 Web 海图构建基于 5m 等深线的实验环境, 确定全局路径规划的安全性优化目标, 建立全局路径规划子模型。

1 实验部分

1.1 海图数据处理

首先, 对于海图中渲染了不同颜色的面数据, 用像素阈值分割技术进行处理。其中, 满足水深约束条件的处理为可航区域, 其他为障碍物区域。其次, 筛选实验区域内碍航的点、线数据绘制在实验环境模型中。最后, 将海图数据构建为栅格化环境模型。

由于栅格化环境模型下生成的路径为直角坐标系下的栅格位置点, 为了能够在实际中指导无人艇的航行, 需要对栅格节点与地理坐标系 (经度、纬度) 进行转换, 坐标转换计算原理如图 1 所示。图 1 表示一块最大纬度和最小纬度为 Lat_{max} 、 Lat_{min} , 最大经度和最小经度为 Lon_{max} 、 Lon_{min} 的海图区域。对应的横向栅格数目为 m , 纵向栅格数目为 n 。经纬度与栅格坐标的转换公式如下:

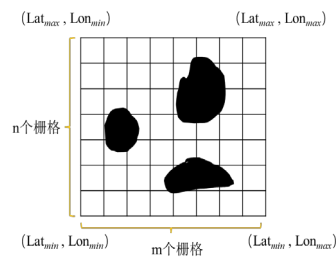


图 1 坐标转换示意图

$$\begin{cases} Lat = \frac{y(Lat_{max} - Lat_{min})}{n} + Lat_{min} \\ Lon = \frac{x(Lon_{max} - Lon_{min})}{m} + Lon_{min} \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中, Lat 和 Lon 分别表示无人艇航行过程中的位置点坐标, x 和 y 分别表示栅格图中横向坐标和纵向坐标。

1.2 Voronoi-field 算法

维诺场是 Dolgov^[9] 等提出的在维诺图区域边界与障碍物之间按比例添加的危险势场, 路径越靠近 VE, 则维诺场值越接近于 0, 越安全; 路径越靠近障碍物, 则维诺场值越接近于 1, 越危险。维诺场定义如下所示:

$$\rho_r(x, y) = \left(\frac{\alpha}{\alpha + d_o(x, y)} \right) \left(\frac{d_v(x, y)}{d_o(x, y) + d_v(x, y)} \right) * \left[\frac{(d_o - d_o^{\max})^2}{(d_o^{\max})^2} \right] \quad (2)$$

式(2)中, $d_o(x, y)$ 为当前节点到障碍物的距离; $d_v(x, y)$ 为当前节点到维诺边界的距离; $\alpha > 0$ 是控制势场衰减率的常数; $d_o^{\max} > 0$ 是控制势场最大作用范围的常量。

该公式适用于当势场值为 0 时; 因此, 若将公式中的 $d_o^{\max}$ 设置为 $d_o^{\max} = D$, 根据公式可知, 维诺场值为 0 的航行区域与障碍物之间的距离均大于 USV 需要保持的安全距离 D 。无人艇航行在维诺场值为 0 的区域能够降低碰撞风险。

1.3 改进 A-star 算法

A-star 算法作为一种常用的启发式路径搜索算法, 被广泛应用在全局路径规划领域。它的搜索方式有 4 连通区域搜索和 8 连通区域搜索两种, 考虑到 USV 在海洋中的运动特性, 文中采用八连通区域的搜索方式对可航水域进行搜索。本文将危险度函数作为评价函数的一部分进行路径规划, 改进后 A-star 算法的启发式函数 $f(n)$ 定义如下:

$$f(n) = g(n) + h(n) + D(n) \quad (3)$$

式(3)中, $g(n)$ 为起始点到当前节点的实际距离代价, $h(n)$ 为估算当前节点到目标节点的距离代价。 $D(n)$ 为利用维诺场为栅格添加危险度的危险度函数。 $D(n)$ 的定义如下:

$$D(n) = \begin{cases} \infty, \rho_v > 0 \\ 0, \rho_v = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, ρ_v 为当前节点处的维诺场值; $d_v(x, y)$ 为当前节点到维诺边界的距离; D 为安全约束距离。

2 结果与讨论

本文对选定的海图区域进行栅格化处理, 划分为 500×500 的栅格, 每个栅格代表 25m。针对 USV 的操纵性能, 设定了 100m、200m、300m 的安全距离约束。基于不同安全距离约束并且平滑优化后的全局路径规划结果如图 3 所示, 图 3(a) 为栅格环境中规划路径的显示, 图 3(b) 为重绘的海图水深环境中规划路径的显示。

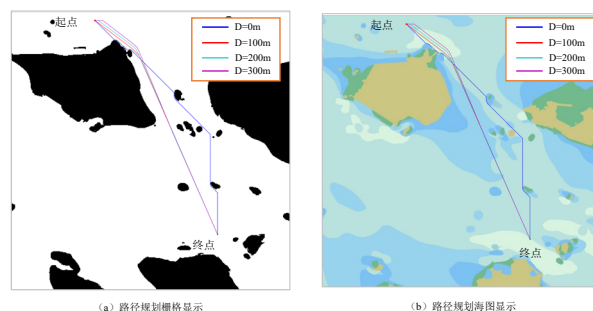


图 2 不同安全距离约束下的全局路径规划结果

图 2 为传统 A-star 算法与不同安全距离约束条件下 A-star 算法的实验结果的对比。其中, 蓝色实线为没有添加安全距离约束的 A-star 算法全局路径规划的结果, 可以看出规划的路径在障碍物附近贴近障碍物, 这无疑会增加无人艇与障碍物之间的碰撞风险。红色、青色与洋红色分别为保持 100m、200m、300m 安全距离约束的路径规划结果, 可以看出随着距离约束的增加, 规划出的路径在靠近障碍物时能够保持距离约束并且安全距离越大的路径与障碍物的距离越远, 所提的方法能够保证安全水深的约束。

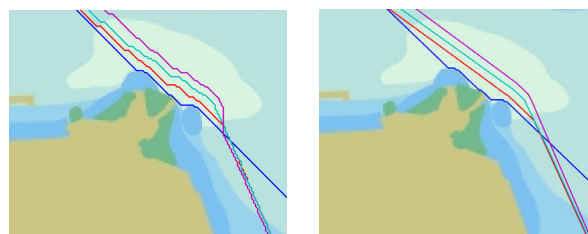


图 3 不同安全距离约束下路径平滑效果对比

图 3 为部分规划路径平滑优化前后的对比。图 3(a) 为平滑优化前的路径, 路径转折次数多、不平滑, 不符合航海实际与无人艇性能要求; 图 3(b) 为平滑优化后的路径, 路径转折次数少、平滑性高, 具有较高的指导意义。

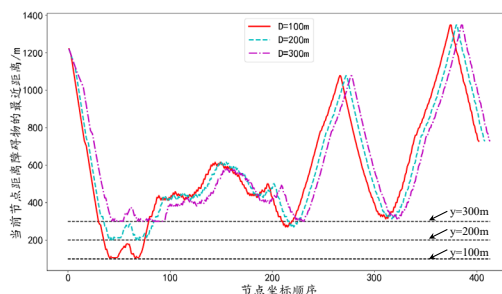


图 4 不同安全距离下路径节点与障碍物的距离

图 4 为三种不同安全距离下路径节点与障碍物之间的距离, 从图中设置的黑色横向虚线可以看出, 路径节点均与障碍物保持了设定的安全距离, 能够提高无人艇

航行过程中的安全系数。

3 结论

本文针对无人艇全局路径规划展开研究,提出了基于海图环境的全局路径规划方法,在研究中着重考虑水深及安全距离的约束。首先,利用海图水深环境进行满足水深约束的环境建模;其次,利用 Voronoi Field 算法进行安全距离约束设置并结合 A* 算法实现了在 100m、200m、300m 不同安全距离下的路径规划;最后,利用路径规划中采集的数据可视化,分析了算法合理性和可行性。

参考文献:

- [1] 刘帅. 复杂海洋环境无人艇路径规划算法研究 [D]. 天津大学, 2019.
- [2] 柳晨光, 初秀民, 吴青, 等. USV 发展现状及展望 [J]. 中国造船, 55(4):12.
- [3] 马天宇, 杨松林, 王涛涛, 等. 多 USV 协同系统研究现状与发展概述 [J]. 舰船科学技术, 2014, 36(6):7-13.
- [4] 曲毅, 潘民子. 无人艇路径自主规划方法及策略研究

综述 [J]. 信息通信, 2019(8).

[5] SINGH Y, SHARMA S, SUTTON R, et al. A constrained A* approach towards optimal path planning for an unmanned surface vehicle in a maritime environment containing dynamic obstacles and ocean currents[J]. Ocean Engineering, 2018, 169: 187 - 201.

[6] CANDELORO M, LEKKAS A M, S Ø RENSEN A J. A Voronoi-diagram-based dynamic path-planning system for underactuated marine vessels[J/OL]. Control Engineering Practice, 2017, 61(November 2016): 41 - 54.

[7] NIU H, LU Y, SAVVARIS A, et al. Efficient Path Planning Algorithms for Unmanned Surface Vehicle[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(23): 121 - 126.

[8] ZHANG W, XU Y, XIE J. Path Planning of USV Based on Improved Hybrid Genetic Algorithm[J]. European Navigation Conference, ENC 2019, 2019.

[9] DOLGOV D, THRUN S, MONTEMERLO M, et al. Practical search techniques in path planning for autonomous driving[J]. AAAI Workshop - Technical Report, 2008, WS-08-10: 32 - 37.

