

基于快速行进平方法的水面无人船路径规划

刘蔚^{1,2,3}, 谈果戈⁴, 邹劲⁴, 董超^{1,2,3}, 唐梓力^{3,5}

1. 国家海洋局南海调查技术中心, 广东 广州 510300;
2. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广东 广州 510300;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519080;
4. 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
5. 珠海云洲智能科技有限公司, 广东 珠海 519099

基金项目: 全球变化与海气相互作用专项; 海洋科学技术局长基金资助项目(1701); 广东省海洋经济发展专项(GDNRC[2020]018); 国家自然科学基金资助项目(U180920009, 61971198)

通信作者: 邹劲, zoujin19@126.com 收稿/录用/修回: 2020-07-13/2020-09-14/2020-12-15

摘要

针对水面无人船控制系统中的重要组成部分之一的路径规划, 本文基于快速行进平方法对其进行了研究. 首先建立了路径评价函数, 根据水面无人船所处的真实环境, 对基于不同参数 Sat 规划所得路径的特征进行量化, 从而选择适用于本海域的 Sat 值, 以进行动态环境下路径规划的研究. 之后, 本文对快速行进平方法进行了适当改进, 对路径规划过程进行了优化, 当无人船没有碰撞危险时, 仅使用快速行进平方法进行一次全局路径规划, 而当无人船探测到障碍船只后, 再利用快速行进平方法进行局部路径规划. 并在此过程中对速度势场进行改良, 人为加入不可航行区域, 使得无人船沿局部路径航行时, 可以做出符合国际海上避碰规则所规定的动态避碰行为. 最后, 通过 Matlab 仿真, 将本文提出的改进快速行进平方法与原始快速行进平方法进行对比, 验证了本文提出的改进算法可以极大减小路径规划的时间, 所得到的路径光滑且连续, 在复杂环境下具有较高的安全性, 适用于水面无人船在实际中的应用.

关键词

水面无人船
快速行进平方法
路径规划
国际海上避碰规则
中图分类号: U664.82
文献标识码: A

Fast Marching Square Method Based Path Planning of the Unmanned Surface Vehicle

LIU Wei^{1,2,3}, TAN Guoge⁴, ZOU Jin⁴, DONG Chao^{1,2,3}, TANG Zili^{3,5}

1. South China Sea Marine Survey and Technology Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China;
2. Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Guangzhou 510300, China;
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519080, China;
4. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
5. OceanAlpha Group Ltd., Zhuhai 519099, China

Abstract

To perform path planning for the unmanned surface vehicle (USV), which is one of the essential components of the USV's control system, we investigate a USV path-planning method based on the fast marching square (FMS). Firstly, we establish an evaluation function for the realistic marine environment of the USV to quantify the characteristics of the planned path under different Sats. Using the evaluation function, a suitable Sat is chosen to further conduct research on path planning in a dynamic environment. Appropriate improvements are made to the FMS method to optimize the path-planning process. When there is no collision risk, the FMS method is used to plan just one global path. When the USV detects other vessels, the FMS method is used for local path planning. In this process, when navigating along local paths, the velocity potential field is

Keywords

unmanned surface vehicle (USV);
fast marching square (FMS);
path planning;
international regulations for preventing collisions at sea (COLREGS)

improved and a non-navigable area is artificially added to enable the USV to complete dynamic collision avoidance behaviors that comply with the International Regulations for Preventing Collisions at Sea. Using Matlab simulations, we compared the performance of the proposed improved FMS method with that of the original FMS. The results show that the proposed algorithm greatly reduces the path-planning time, obtains a smooth and continuous path, and maintains high safety in complex environments, which make the USV suitable for the practical application.

0 引言

近年来, 无论国内还是国外, 包括无人车、无人机、无人船在内的无人系统, 都得到了蓬勃的发展. 无人船作为应用于海洋的一类无人系统, 包括水面无人船和水下无人艇, 已经广泛应用于海洋环境的监测、海底地形的勘察、海底电缆的维护维修、海上搜救消防、港口及海岸线的安防等军民领域.

水面无人船作为一类基本无人系统, 其控制系统组成复杂, 而路径规划是其控制系统中的一个重要的组成部分. 针对路径规划问题, 国内外的学者提出了多种方法, 其中具有代表性的方法有 Dijkstra 方法^[1]、A* 算法^[2]、粒子群优化算法^[3-6]、遗传算法^[7]、人工势场法^[8-9]和快速行进法^[10-11]等.

遗传算法高效且能够进行并行处理, 但是利用遗传算法规划所得的路径缺乏收敛性和一致性, 使得无人船难以跟踪. 相较于遗传算法, 粒子群优化算法比较简单, 但是针对不同的任务需求没有一种特定的理论来指导路径的生成, 因此在实际应用当中还存在一定的局限性. 在无人船的路径规划当中, Dijkstra 方法以及 A* 算法是两种较为有效的方法. 利用这两种方法生成的路径具有很好的收敛性和一致性, 但缺乏光滑性, 不利于水面无人船在实际海洋环境下进行跟踪. 人工势场法是一种较为经典的路径规划算法, 由于基本思想简单、应用方便, 因此在陆地机器人^[12-13]和无人船^[14]方面的应用都较为广泛. 但是人工势场法存在局部极小值问题这一局限性, 尤其是在环境较为复杂的情况下十分显著, 限制了其在实际中的进一步应用.

快速行进法 (fast marching method, FMM) 通过模拟电磁波的传播过程来构建势场, 所得势场的全局最小值点位于最终的目标点, 再利用梯度下降法规划路径, 使得无人船沿着所得的路径可以一直航行到目标点. 因此, 快速行进法有效地解决了人工势场法的局部极小值这一弊端. 同时, 与 Dijkstra 方法以及 A* 算法等方法相比^[15-16], 快速行进法存在使用简单、响应速度快等优点, 利用梯度下降法生成的路径也具有足够的光滑性和连续性, 适用于无人船的路径跟踪, 因此得到了广泛关注.

但传统的快速行进法也存在一定的局限性, 即生成的路径较为靠近环境中的障碍物, 安全性欠佳^[17-18]. 针对这一问题, 很多学者提出了不同的改进算法^[19-22], 最常用的即为快速行进平方 (fast marching square, FMS) 法. 该方法在保留了快速行进法优点的同时, 生成的路径与障碍物保持一定的距离, 极大地提高了无人船沿此路径航行的安全性 (见图 1).

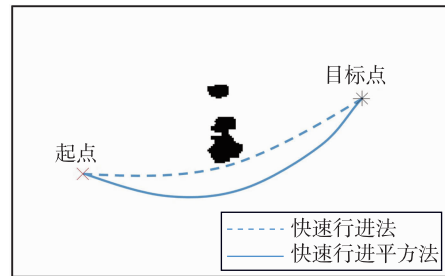


图 1 快速行进法及快速行进平方法规划的路径

Fig.1 Paths planned by the FMM and the FMS

但在利用快速行进平方法进行无人船的路径规划过程中, 如何针对无人船航行的海域特点及船艇自身的运动特性对该方法使用过程中的阈值参数 Sat 进行选取, 从而生成适用于实际环境的规划路径这一问题, 现存的研究并未涉及. 同时, 如何将船舶在海上航行都需要遵守的国际海上避碰规则 (COLREGS) 所规定的避碰行为融入到快速行进平方法当中来, 使得当存在碰撞危险时, 无人船沿着基于该方法规划所得局部路径航行时能够做出相应的避碰行为, 也是本文研究的问题之一.

针对上述问题, 文章基于快速行进平方法, 提出了一种适用于水面无人船在真实海洋环境中应用的改进快速行进平方法, 该改进方法主要有以下几点创新:

1) 针对快速行进平方法使用过程中无法对阈值参数 Sat 进行量化选择的问题, 本文建立了路径评价函数, 分别通过路径长度、与障碍物的最短距离及无人船沿路径航行的航向角变化等方面, 选择适用于当前环境下的快速行进平方法的参数 Sat .

2) 对基于快速行进平方法的无人船路径规划过程进行了改进, 在没有碰撞危险下, 仅利用该方法进行一次全局路径规划; 当障碍船只进入无人船的探测距离, 再基于该方法进行局部规划; 当碰撞危险消除后, 继续沿全局路径进行航行、相比较于持续使用快速行进平方法进行路径规划, 该方法大大减小了规划所需的时间.

3) 对快速行进平方法所得速度势场 $W(x)$ 进行了改进, 针对 COLREGS 规定的避碰行为, 人为加入不可航行区域, 使得无人船沿局部规划路径航行时可以做出相应的避碰行为, 极大满足了水面无人船在真实环境当中的应用需求.

1 基本原理

1.1 快速行进法

快速行进法是一种典型的平行集方法, 其基本思想可以简单理解为将一个石子扔入水面激起水面波纹传播的过

程^[23]. 石子落入水面后, 水面波纹以石子入水这一点为原点向周围扩散. 由于介质相同, 因此波纹传播的速度也是相同的. 经过一定的时间, 波纹最终传播到达目标点位置, 而波纹从原点传播到目标点所经历的路径就是时间意义上的最短路径.

从数学角度上, 快速行进法即是通过迭代求解程函方程(Eikonal equation)来模拟波面传播的这一过程:

$$|\nabla T(x, y)| = \frac{1}{W(x, y)} \quad (1)$$

式中, $T(x, y)$ 是所要求的波面传播到位置 (x, y) 点的时间, $W(x, y)$ 是波面传播的速度.

通过离散化梯度 $\nabla T(x, y)$ 能够在空间中每点 (x, y) 迭代求解程函方程. 将无人船所处的环境空间进行离散, 通过下式简化所要求解的点 (x, y) 处的梯度:

$$T_1 = \min(T(x - \Delta x, y), T(x + \Delta x, y)) \quad (2)$$

$$T_2 = \min(T(x, y - \Delta y), T(x, y + \Delta y)) \quad (3)$$

式中, Δx 、 Δy 为离散空间的 x 和 y 方向上的间距.

再将式(2)和式(3)代入程函方程并平方, 得到离散化形式:

$$\left(\frac{T(x, y) - T_1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{T(x, y) - T_2}{\Delta y}\right)^2 = \frac{1}{(W(x, y))^2} \quad (4)$$

从初始界面 ($T(x, y) = 0$) 开始, 迭代求解式(4), 在后续的迭代过程使用前次迭代中已求解过的点来计算其临近点的 T 值, 直至所有点都被求解完成.

1.2 快速行进平方法

由于快速行进法得到的路径与障碍物之间的距离过短, 安全性不足, 因此学者提出了快速行进平方法. 该方法与快速行进法的基本思想是相同的, 唯一的区别在于, 基于不同的目标位置, 将快速行进法应用了两遍: 1) 首先输入无人船所处的环境, 并将其转化为二进制图的形式(图 2(a)), 其中黑色区域代表环境中的障碍物, 如岛屿、陆地等, 白色区域代表无人船可以自由航行的海域; 2) 在所有表示障碍物的位置 (x, y) , 第一次应用快速行进法, 得到波面传播的速度势场 $W(x)$ (图 2(b)), 该势场中每一点数值的大小代表该点距离其最近的障碍物的距离, 数值的取值范围为 $[0, 1]$. 数值为 0, 代表该点距离障碍物最近, 亦即障碍物本身所处的位置, 而数值为 1, 代表该点距离障碍物足够远, 规划的路径通过该点具有足够的安全性; 3) 基于生成的速度势场 $W(x)$, 第二次应用快速行进法, 从任务的最终目标点出发模拟波面的传播过程, 从而生成到达时间的势场 $D(x)$ (图 2(c)). 该势场中每一点数值的大小代表波面从目标点出发传播到达该点所需要的时间, 因此目标点的数值为 0, 为全局最小值点. 基于这一过程, 该方法克服了人工势场法的局部极小值这一问题, 提高了无人船在复杂海洋环境当中规划路径的适用性; 4) 根据生成的势场 $D(x)$, 使用梯度下降法, 产生连接无人船当前位置到任务目标点的一条光滑路径(图 2(d)).

在步骤 2) 利用快速行进平方法生成速度势场 $W(x)$ 的过程中, 使用了一个重要的参数 Sat, 通过选取不同的 Sat 值, 设置相应的阈值, 将势场中所有值小于该阈值的点 p_i

全部设为障碍物 ($w_{p_i} \in [0, Sat] \rightarrow 0$), 类似于将障碍物附近一定范围内的区域近似当作障碍物处理(图 3), 使得无人船在沿着规划路径航行当中可以与障碍物保持充分的距离.

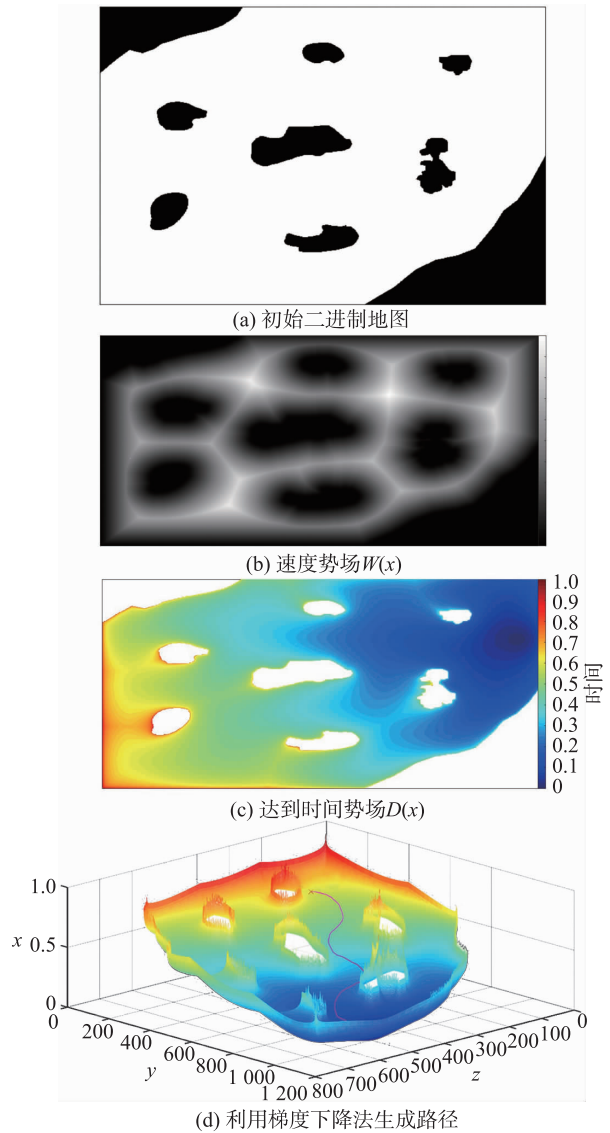
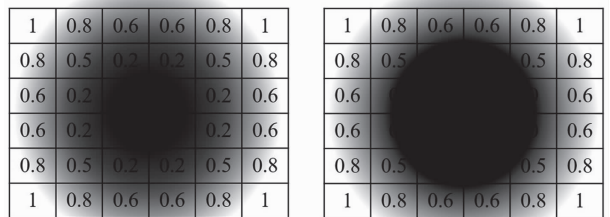


图 2 FMS 路径规划过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of the path planned by the FMS



(a) 设置阈值前的速度势场 $W(x)$ (b) 设置阈值后的速度势场 $W(x)$

图 3 设置 Sat = 0.5 后的速度势场 $W(x)$ 示意图

Fig.3 Schematic diagram of the velocity potential field $W(x)$ when Sat = 0.5

为了更清楚地看出不同阈值参数 Sat 对速度势场 $W(x)$ 的影响及相应生成的规划路径的差异, 图 4 所示为使用 3 个不同的 Sat 值产生的速度势场及路径示意图。

可以看出, 根据不同 Sat 值在同一海域下规划所得的路径存在很大的差异, 而现今学者对于快速行进平方法的研究, 大多是随意选择一个适中的 Sat 值, 并没有一个基于无人船的航行海域特点以及无人船自身特性对 Sat 值进行选择的量化处理方法。同时, 对于存在动态障碍船的情况, 使用快速行进平方法进行无人船的路径规划, 大多在运动的开始阶段就获知了障碍船只的位置及运动状态, 并在每时刻都对无人船在障碍船影响下的路径进行规划。这在实际应用中是不现实的, 因为在未知环境当中, 无人船无法通过自身搭载的设备预先获得探测范围以外其他船只的信息, 而且时刻使用快速行进平方法进行路径规划, 也

大大占用了船上有限的资源。另外, 水面无人船在航行的过程中, 也要遵循国际海上避碰规则 (COLREGS) 的相关规定, 当存在碰撞危险时, 无人船要及时进行局部路径规划, 采取合适的避碰行为, 而如何将 COLREGS 规定的避碰行为融入到快速行进平方法的路径规划当中, 目前的研究也并未涉及。因此, 本文针对上述问题, 提出了改进快速行进平方法。

2 改进快速行进平方法

2.1 路径评价函数

由图 4 可以看出, 对于同一海域, 由于快速平方行进法使用的阈值参数 Sat 值的不同, 产生的速度势场 $W(x)$ 及最后规划所得的路径都有明显的区别。随着 Sat 值的增加, 规划路径与障碍物的最短距离有所增加, 水面无人船

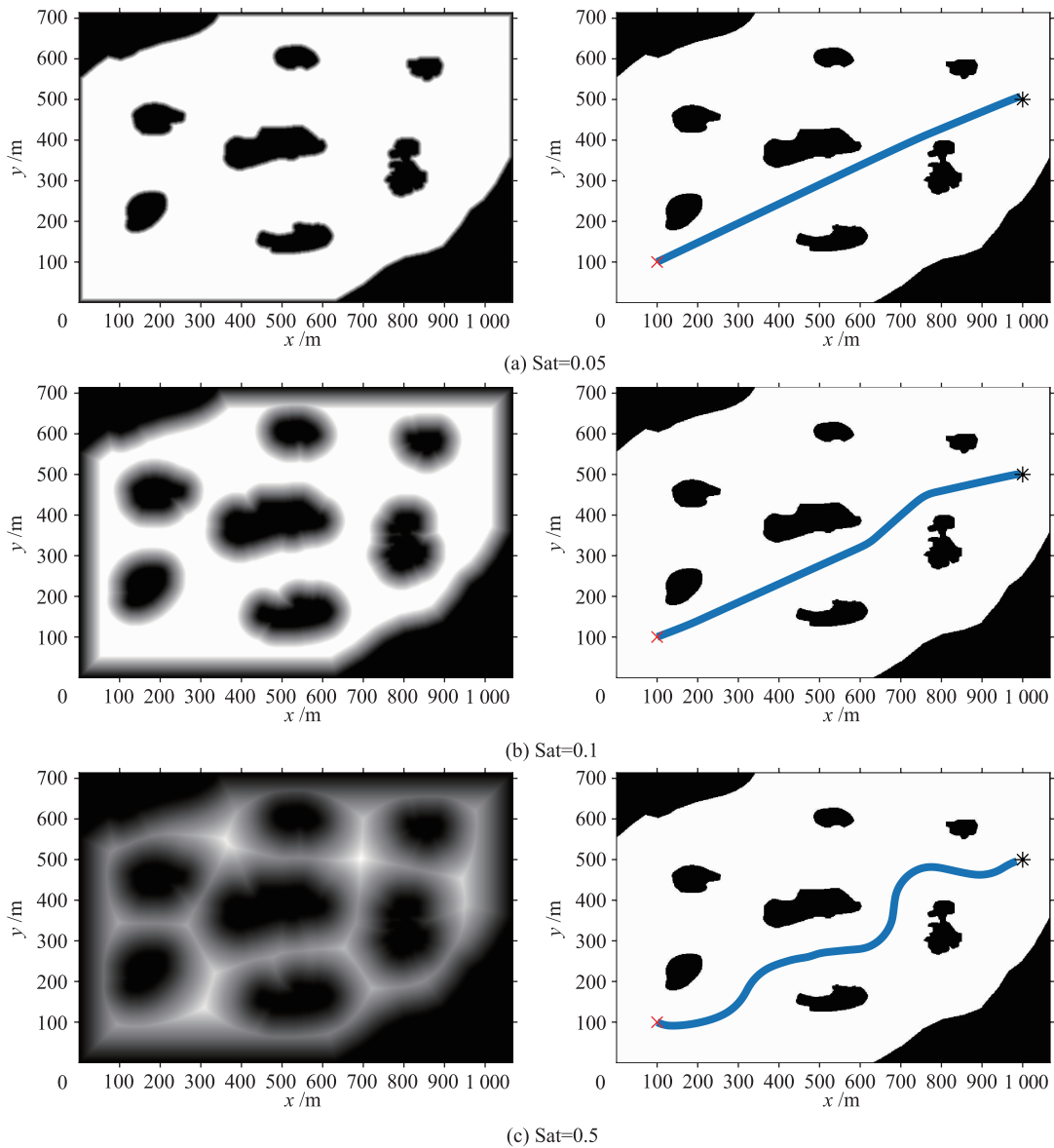


图 4 基于不同 Sat 值的 FMS
Fig.4 FMS based on different Sats

沿规划路径在固定起始点和目标点之间航行会存在绕远的现象,经济性有所下降.同时,随着 Sat 值的增加,路径弯曲程度也加大,无人船在沿该路径航行的过程中,航向角也需要改变地更加频繁,这对无人船的操纵及控制提出了更高的要求.

现今学者在使用快速行进平方法进行智能体的路径规划时,大多采取一个适中的 Sat 值,但是对于不同环境下选择的 Sat 值是否合适,并没有一个量化的评判标准.针对这一问题,本文提出了适用于快速行进平方法路径规划的评价函数,通过路径长度、与障碍物的最短距离及无人船沿路径航行的航向角变化等方面,选择适用于当前环境的快速行进平方法的参数 Sat 以进行路径规划.

路径评价函数设置如下:

$$E = k_1 \frac{1}{L'} + k_2 \frac{1}{P'} + k_3 D' \quad (5)$$

其中, L' 、 P' 、 D' 分别表示规划路径长度、航向角变化次数和与障碍物的最短距离.由于上述 3 个参数量纲不同,无法直接进行运算,故进行无量纲化处理后再代入式(5)进行计算; k_1 、 k_2 、 k_3 为权重系数且满足 $k_1 + k_2 + k_3 = 1$, 用于针对不同类型的无人船,调整上述 3 个参数在评价路径方面的权重.比如,对于小型水面无人船,由于其载重量小,所能携带能源少,因此需要强调规划所得路径长度要尽量短,从而节省能源.而由于其小型化,吃水较浅,因此对于距岛屿、海岸线的距离可不必过于重视.而对于某些大型无人船,其吃水深、操纵性较差,则需要充分关注规划路径与障碍物的最短距离及其沿规划路径航行的航向角变化.

评价函数中 L' 、 P' 取为归一化参数的倒数形式,意味着对于同样的权重,在充分考虑了水面无人船航行的安全性、经济性和控制复杂性等因素,规划所得路径的优良程度与路径长度 L 和航向角的明显变化次数 P 成反比,而与障碍物的最短距离 D 成正比.对于同一艘无人船在同样的环境下,利用快速行进平方法规划的路径,长度越短、航向角的明显变化次数越少、与障碍物的最短距离越长,则路径越优,从而可以选择此时的 Sat 值进行水面无人船的路径规划.

2.2 改进速度势场

为了提高基于快速行进平方法的无人船路径规划方法在实际当中的实用性,本文根据国际海上避碰规则(COLREGS)的相关规定^[24],人为修改快速行进平方法在路径规划当中的速度势场 $W(x)$,使得无人船在沿规划路径航行时,可以做出符合 COLREGS 规定的避碰行为.

COLREGS 对船舶在航行过程中可能出现碰撞危险的几种会遇场景时需要做出的避碰行为进行了规定:

1) 在对遇场景下,两船都需要向右转舵从对方的左舷驶过.

2) 在交叉相遇场景下,处于他船右舷的船舶属于直行船,而位于他船左舷的船舶需要主动让行.

3) 在追越场景下,前方船只作为被追越船,应当保持当前的航速和航向;而后船为追越船,应当从被追越船的侧舷驶过.

本文假设当障碍船只进入水面无人船的探测范围后,无人船可以通过自身搭载的探测设备获得对方船只的船长 L^{obs} 、船宽 B^{obs} 、航速 u^{obs} 、艏向角 ψ^{obs} 及位置 $(x_{\text{obs}}, y_{\text{obs}})$ 等信息,以此建立会遇场景数学模型(见图 5).

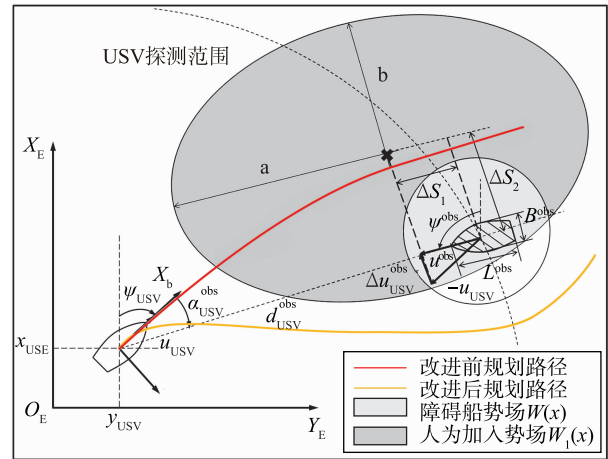


图 5 应用改进快速行进平方法的改进速度势场及路径规划示意图

Fig.5 Diagram of the improved potential field and the path planned by the improved FMS method

无人船根据自身以及障碍船只的相关信息,可以获得二者之间的相对方位角度:

$$\alpha_{\text{USV}}^{\text{obs}} = \arctan(y_{\text{obs}} - y_{\text{USV}}, x_{\text{obs}} - x_{\text{USV}}) - \psi_{\text{USV}} \quad (6)$$

通过相对方位角度 $\alpha_{\text{USV}}^{\text{obs}}$ 可以判断无人船与障碍船只所处的会遇场景:

- 1) $\alpha_{\text{USV}}^{\text{obs}} \in (-15^\circ, 15^\circ]$: 对遇场景.
- 2) $\alpha_{\text{USV}}^{\text{obs}} \in (15^\circ, 112.5^\circ]$: 右舷交叉场景.
- 3) $\alpha_{\text{USV}}^{\text{obs}} \in (-112.5^\circ, -15^\circ]$: 左舷交叉场景.
- 4) $\alpha_{\text{USV}}^{\text{obs}} \in (180^\circ, -112.5^\circ] \cup (112.5^\circ, 180^\circ]$: 追越场景.

根据无人船与障碍船只所处的会遇场景,按照 COLREGS 的相关规则,在 USV 需要主动让行的情况下,按以下方式人为设置所需的速度势场 $W_1(x)$:以障碍船的质心位置为原点,沿航向 ψ^{obs} 向其前进方向取距离 ΔS_1 ,沿二者相对航速 $\Delta u_{\text{USV}}^{\text{obs}}$ 方向往障碍船的右舷上取距离 ΔS_2 (ΔS_1 和 ΔS_2 的大小与 u^{obs} 及 $\Delta u_{\text{USV}}^{\text{obs}}$ 成一定比例选取),以此位置为圆心建立椭圆形人工速度势场 $W_1(x)$ (椭圆形势场的长半轴 a 和短半轴 b 的大小分别与障碍船只的船长 L^{obs} 及船宽 B^{obs} 成比例).

将人为加入的势场 $W_1(x)$ 与原始快速行进平方法获得的障碍船只的势场 $W(x)$ 叠加得到改进的速度势场 $W'(x)$.以此改进的速度势场 $W'(x)$ 对水面无人船进行局部路径规划,即可得到符合 COLREGS 规定避碰行为的路径.

3 基于改进快速行进平方法的水面无人船路径规划算法

基于前文所述的路径评价函数及改进速度势场, 对水面无人船进行路径规划的算法伪代码如算法 1 所示.

算法 1 基于改进快速行进平方法的水面无人船路径规划方法

Input: USV 航行海域电子海图, USV 任务执行的起点和目标点

Initialization: 初始化 USV 状态并将电子海图转换成对应的二进制图

1. 在静态环境下遍历不同的 Sat 值, 使用 FMS 生成路径
2. 对式(1)中生成的不同路径应用评价函数, 选择适用于本次任务的 Sat 值
3. 将最合适的 Sat 值生成的路径设为本次任务的全局路径
4. **while** USV 并未到达目标终点 **do**
5. USV 沿全局路径航行
6. **if** USV 探测范围内出现障碍船只 **then**
7. 获取障碍船只信息并建立会遇场景模型
8. 判断会遇场景
9. **if** USV 需要让行 **or** 障碍船只没有做出应有避让行为 **then**
10. 人为加入势场并得到改进速度势场 $W'(x)$
11. 基于 $W'(x)$ 使用 FMS 进行局部路径规划
12. USV 沿局部路径航行
13. **else**
14. USV 继续沿全局路径航行
15. **end if**
16. **end if**
17. **end while**

4 仿真及分析

根据算法 1 提出的基于改进快速行进平方法的水面无人船路径规划方法, 通过 Matlab 仿真验证该算法的有效性和可靠性. 首先选择水面无人船的航行海域为大连地区的一处区域^[25], 电子海图如图 6(a) 所示, 并将其转换为二进制图的形式(图 6(b)). 无人船任务执行的起点和目标点各自选为(200, 200)和(950, 550).

仿真中使用的水面无人船的参数如表 1 所示.

表 1 水面无人船参数
Tab.1 Parameters of the USV

参数	数值
总长 /m	5.2
船宽 /m	1.9
设计吃水 /m	0.42
设计排水量 /kg	1 900
运动模型参数	
$\hat{m}_{11} = 2.4 \times 10^3 \text{ kg}$	$\hat{d}_{11} = 245 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
$\hat{m}_{22} = 3.35 \times 10^3 \text{ kg}$	$\hat{d}_{22} = 2.92 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
$\hat{m}_{33} = 2.49 \times 10^5 \text{ kg}$	$\hat{d}_{33} = 1.22 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

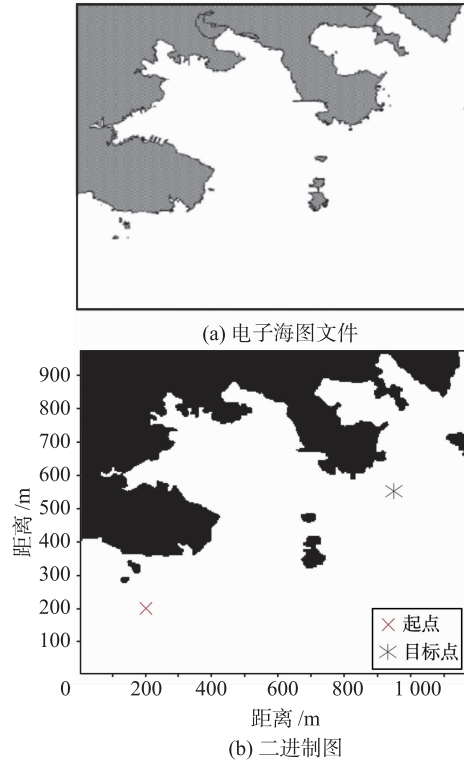


图 6 仿真场景

Fig.6 Simulation scenes

4.1 全局路径规划

在静态环境下选取不同的 Sat 值, 分别利用快速行进平方法生成的速度势场 $W(x)$ 及规划路径, 如图 7 所示.

可以看出, 随着 Sat 值的增加, 利用快速行进平方法得到的速度势场 $W(x)$ 的膨化程度越来越大, 基于 $W(x)$ 利用梯度下降法所得的路径也是不相同的, 路径与障碍物的最短距离逐渐加大, 路径的安全性有所提高, 但是水面无人船沿着路径航行时会存在绕远的现象, 经济性有所下降. 这一点可以通过规划所得路径的参数更好地看出(见表 2).

表 2 不同 Sat 值下规划所得路径的参数

Tab.2 Parameters of paths planned under different Sats

Sat	点(700, 250)在 $W(x)$ 的值	规划路径的长度 L /m	规划路径的计算时间 T /s	与障碍物的最短距离 D /m
0.051	1	868	0.68	57.54
0.1	0.596 3	958	0.71	110.22
0.5	0.308 6	1 041	0.77	150.77

选取位于地图中(700, 250)位置的点, 该点在速度势场 $W(x)$ 中的数值随着 Sat 值的减小而增大. 当 $Sat = 0.5$ 时, 该点的值为 0.308 6, 表明在当前参数 Sat 下, 该点与其最近障碍物的距离较近, 如果水面无人船沿着通过该点的路径航行的话, 不具有足够的安全性, 因此路径点应规划在数值较大的位置上. 而随着 Sat 不断减小到 0.05 时, (700, 250)的点在速度势场 $W(x)$ 中的数值为 1, 表示在当前 Sat 下, 该点与其最近障碍物的距离足够远, 可以作为规划路径点.

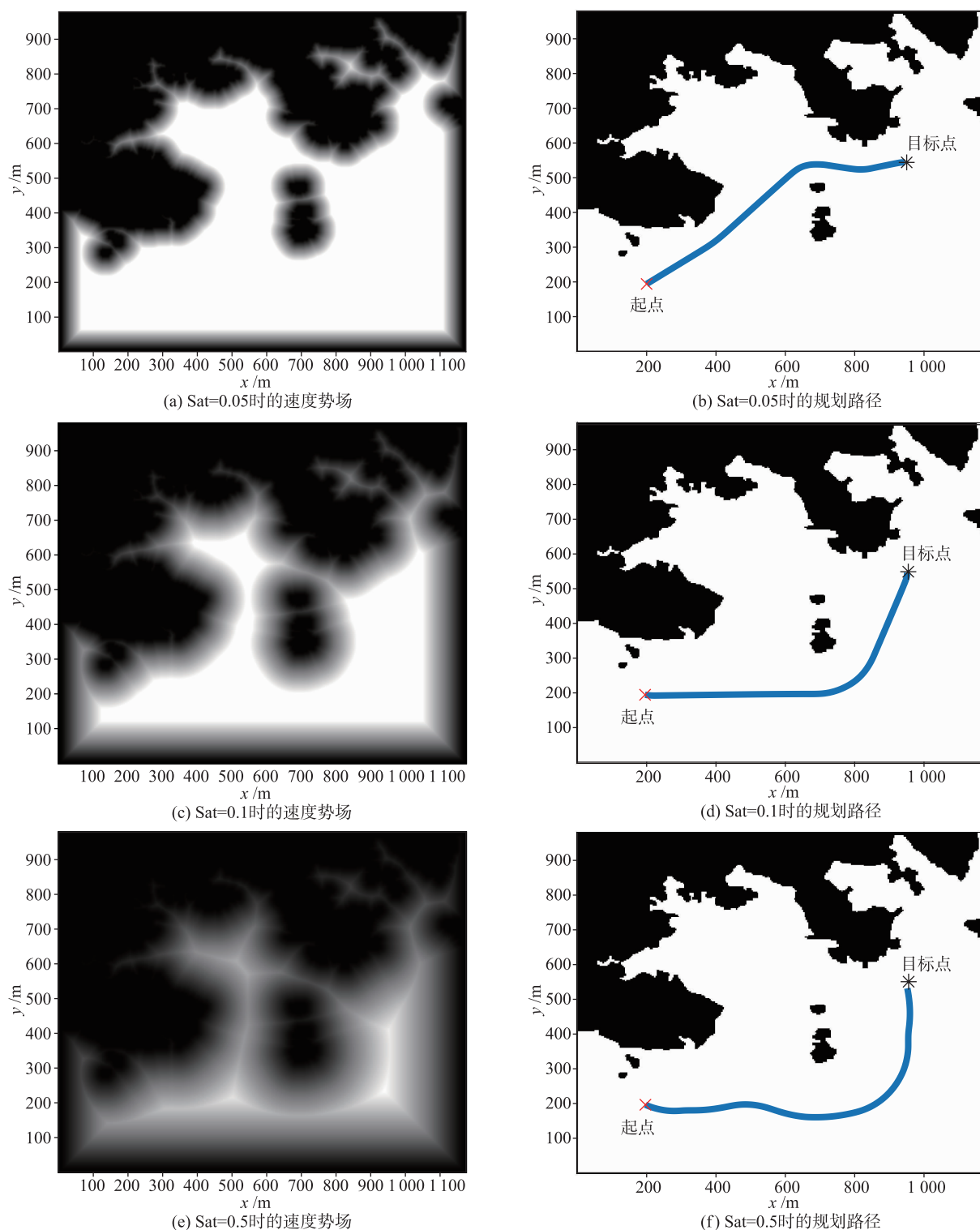


图7 不同 Sat 值下的规划路径示意图

Fig.7 Paths planned by the FMS under different Sats

另外由表3可以看到,当 $Sat = 0.05$ 时,利用快速行进平方法规划所得的路径距海图中间岛屿的最短距离为 57.54 m ,相较于 $Sat = 0.1$ 时的 110.22 m 和 $Sat = 0.5$ 时 150.77 m 来说,距离障碍物相对较近.由于在海岸线、岛屿等附近的海域都是浅水区,这对于船舶尤其是大型船舶

的航行来说是不安全的.

因此,在实际应用当中,为了使水面无人船的航行具有足够高的安全性,希望其沿着规划路径航行时能够尽可能地远离障碍物,这就要求 Sat 的值越大越好.但是通过表3的其余结果可以看出,随着 Sat 值的增大,利用快速

行进平方法所得规划路径的长度从 Sat = 0.05 时的 868 m, 增加到 Sat = 0.5 时的 1 041 m, 涨幅达到 19.93%. 而由于路径的增长, 规划路径的时间也相应增加, 由 Sat = 0.05 时的 0.68 s 增加到了 Sat = 0.5 时的 0.77 s, 增加了 0.09 s. 当无人船具有高航速时, 为保证无人船航行的安全性, 要求其必须具有实时路径规划的能力, 这就要求无人船路径规划所需时间一定要短.

而对于某些操纵性不佳的船舶, 在沿路径航行的过程中如果需要频繁的操舵, 也加大了船舶控制的难度, 因此船舶沿路径航行的航向角的改变也需要在评价规划路径时予以考虑. 在本次仿真中, 无人船沿不同 Sat 值下规划的路径航行时航向角的变化如图 8 所示. 当 Sat = 0.05 时, 无人船的航向角出现了 4 处较为明显的改变, 相比于 Sat = 0.1 时的 1 处和 Sat = 0.5 时 3 处来说, 需要更加频繁的操舵, 而这对无人船的操纵及控制提出了更高的要求.

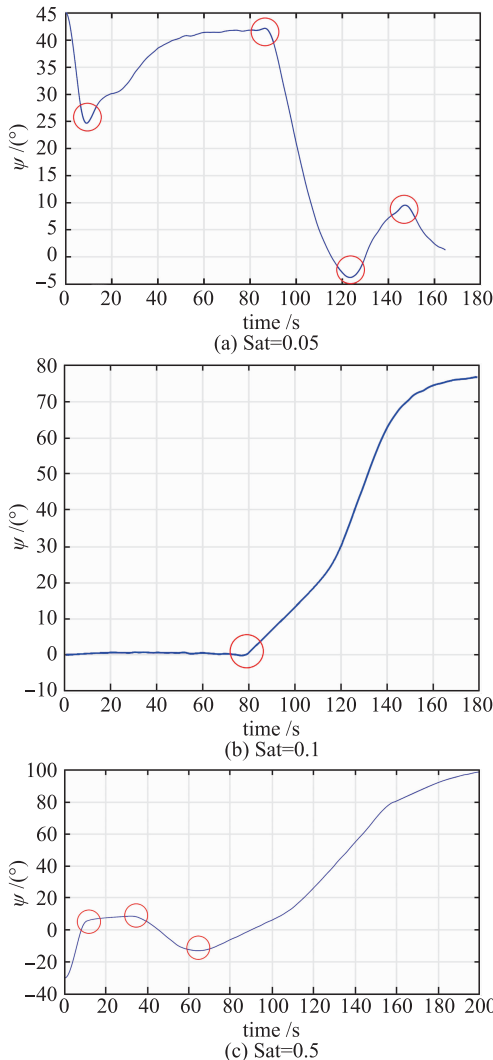


图 8 无人船沿不同 Sat 值规划路径航行的航向角
Fig.8 Headings of path planned of the USV under different Sats

综上所述, 利用快速行进平方法进行水面无人船的路径规划, 在不同 Sat 值下得到的路径在长度、与障碍物的最短距离, 以及无人船沿路径航行的航向角变化等方面, 都有很大的区别. 这些不同直接影响了无人船正常工作时

的安全性、经济性以及运动控制的复杂性等, 需要针对不同航行海域的特点以及无人船自身的运动特性, 综合考虑以上各种因素, 选取合适的 Sat 值从而进行水面无人船的路径规划.

根据本文提出的路径评价函数(式(5)), 对于本次仿真选取的 3 个 Sat 值, 计算所得评价函数结果如表 4 所示. 权重系数取为: $k_1 = 0.6, k_2 = 0.2, k_3 = 0.2$, 主要考虑到本文仿真中使用的水面无人船艇型较小、吃水浅、操纵性较好, 因此对于沿路径航行时与障碍物的距离及运动控制的要求较低, 而由于所携带能源有限, 因此对于路径的长度及沿规划路径航行时的经济性要求较高, 故系数 k_1 所占权重较大. 由表 3 可见, 当 Sat = 0.1 时规划路径的评价函数值最高, 为 1.27, 因此对于本文选取的海域来说, Sat = 0.1 是综合考虑了水面无人船航行的安全性、经济性和控制复杂性下最为合适的参数, 可以以此 Sat 值下规划所得的路径作为水面无人船在本海域从任务执行的起点到目标终点航行的全局路径.

表 3 不同 Sat 值下规划所得路径的评价函数值

Tab.3 Evaluation function values of paths planned under different Sats

Sat	评价函数值 E
0.05	0.2
0.1	1.27
0.5	1.1

4.2 基于改进速度势场的局部路径规划

使用 4.1 节在 Sat = 0.1 下规划的路径作为全局路径, 选择水面无人船在实际环境中航行需要主动让行的对遇和右舷交叉两个会遇场景, 设置动态障碍船只, 验证基于改进速度势场下的无人船局部路径规划算法的有效性. 为了简化仿真过程, 假设障碍船只不进行主动避让. 本次仿真使用的参数如表 4 所示.

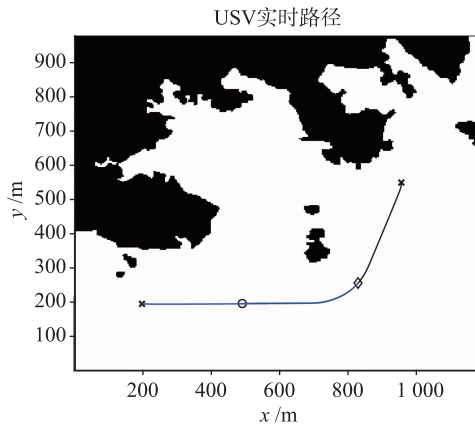
表 4 参数数值

Tab.5 Parameters value

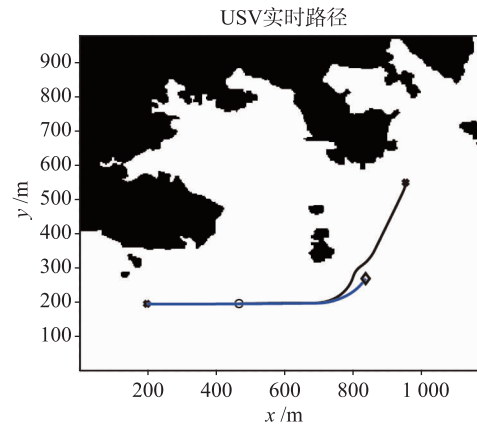
参数	数值
对遇场景下障碍船起始位置	(950, 550)
对遇场景下障碍船终点位置	(200, 200)
右舷交叉场景下障碍船起始位置	(380, 50)
右舷交叉场景下障碍船终点位置	(550, 610)
水面无人船探测距离	100 m
会遇安全距离	52 m

为了更明显地看出改进速度势场的效果, 本次仿真在同样的条件下使用原始快速行进平方法进行路径规划, 在对遇场景和右舷交叉场景下的对比结果分别如图 9、图 10 所示.

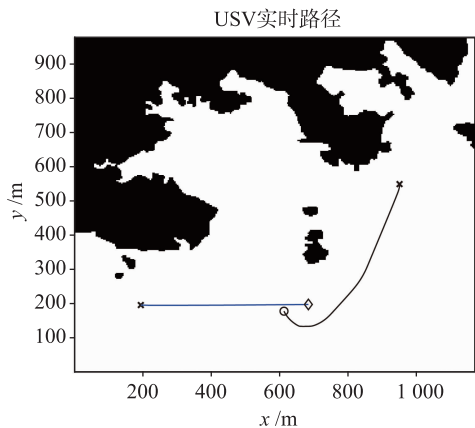
当水面无人船与障碍船只只会遇之前, 基于本文提出的改进快速行进平方法, 在 Sat = 0.1 时进行了一次路径规划, 并将该路径视为全局路径, 无人船沿此路径航行直至探测到障碍船只的存在. 而使用原始快速行进平方法进行路径规划时, 每时刻规划的路径都因为障碍船只的影响而发生变化. 但当障碍船只与无人船距离遥远时, 考虑障碍船只对无人船路径的影响是没有意义的, 而且每时刻都重新进行路径规划, 也极大浪费了无人船上的资源, 在实际应用当中是不可取的.



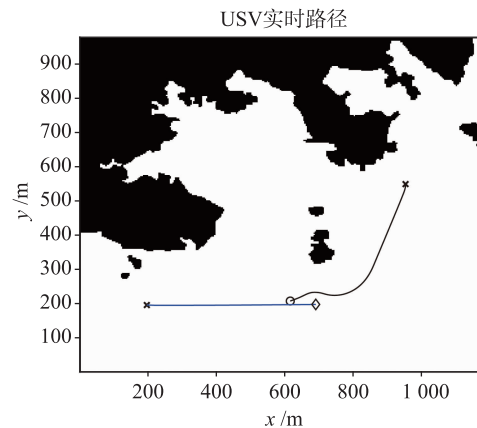
(a) 改进FMS会遇前



(b) 原始FMS会遇前



(c) 改进FMS会遇时



(d) 原始FMS会遇时

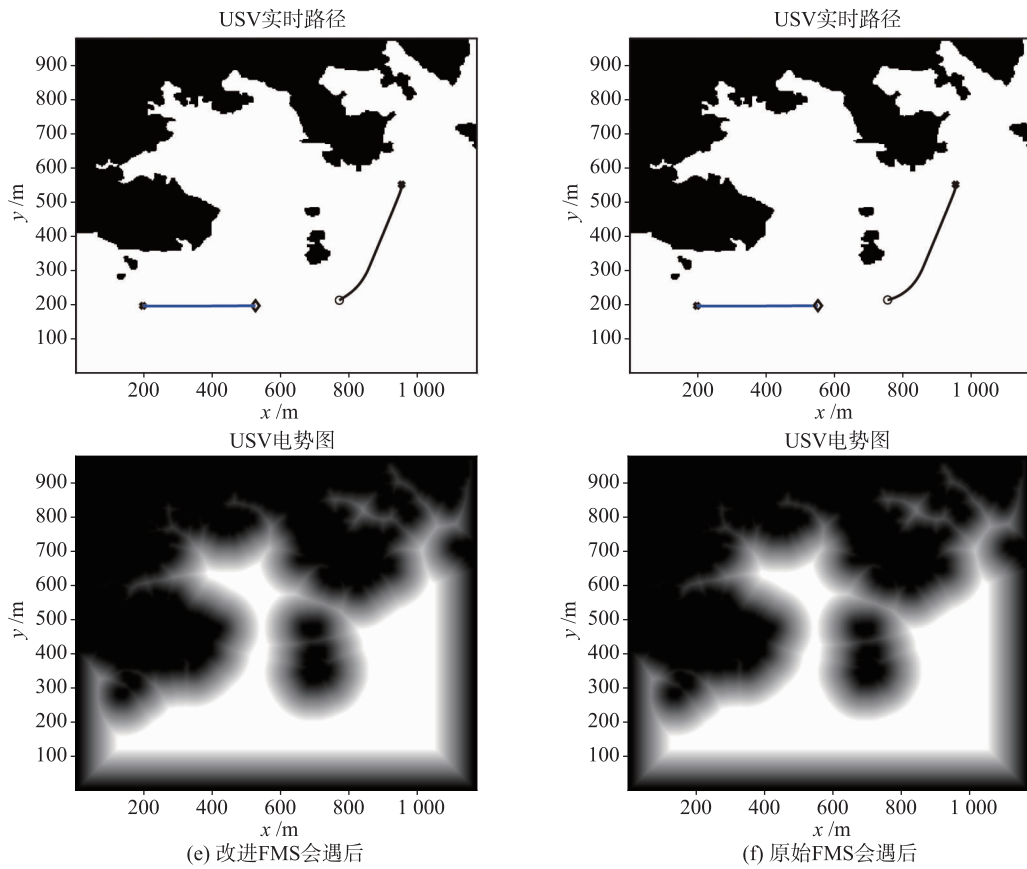
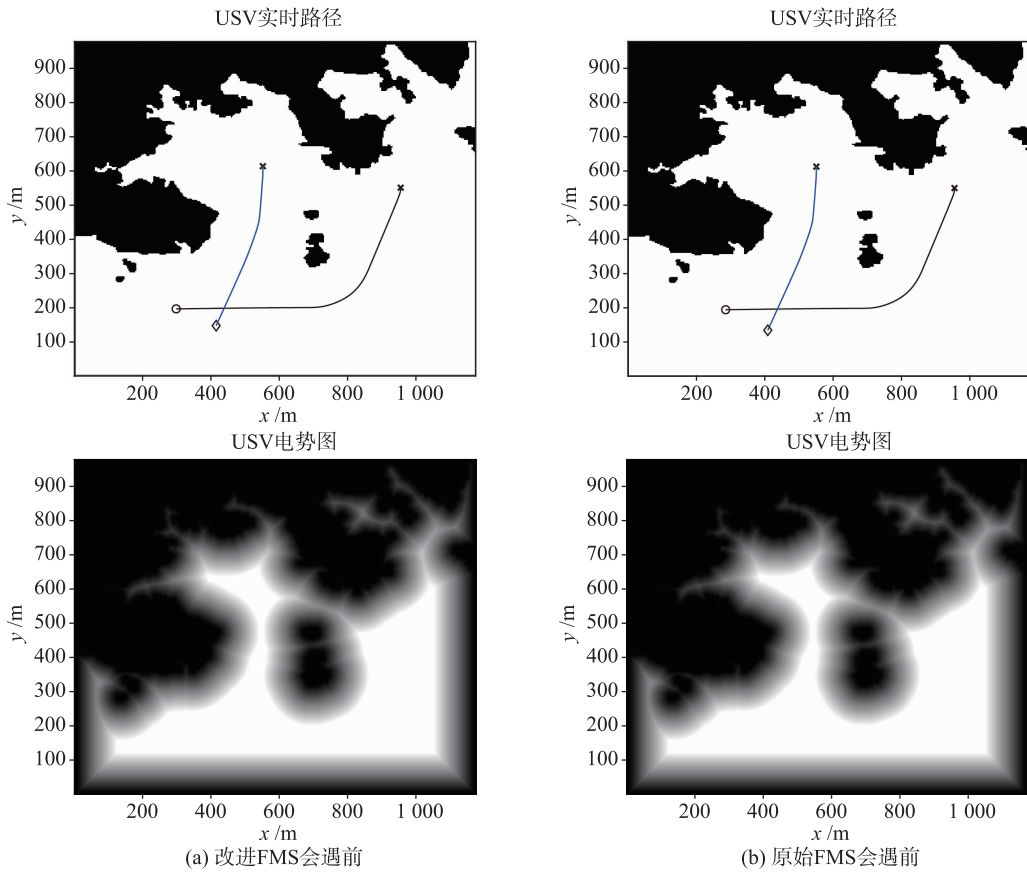


图9 无人船对遇场景对比结果

Fig.9 Comparison results of the 'head-on'



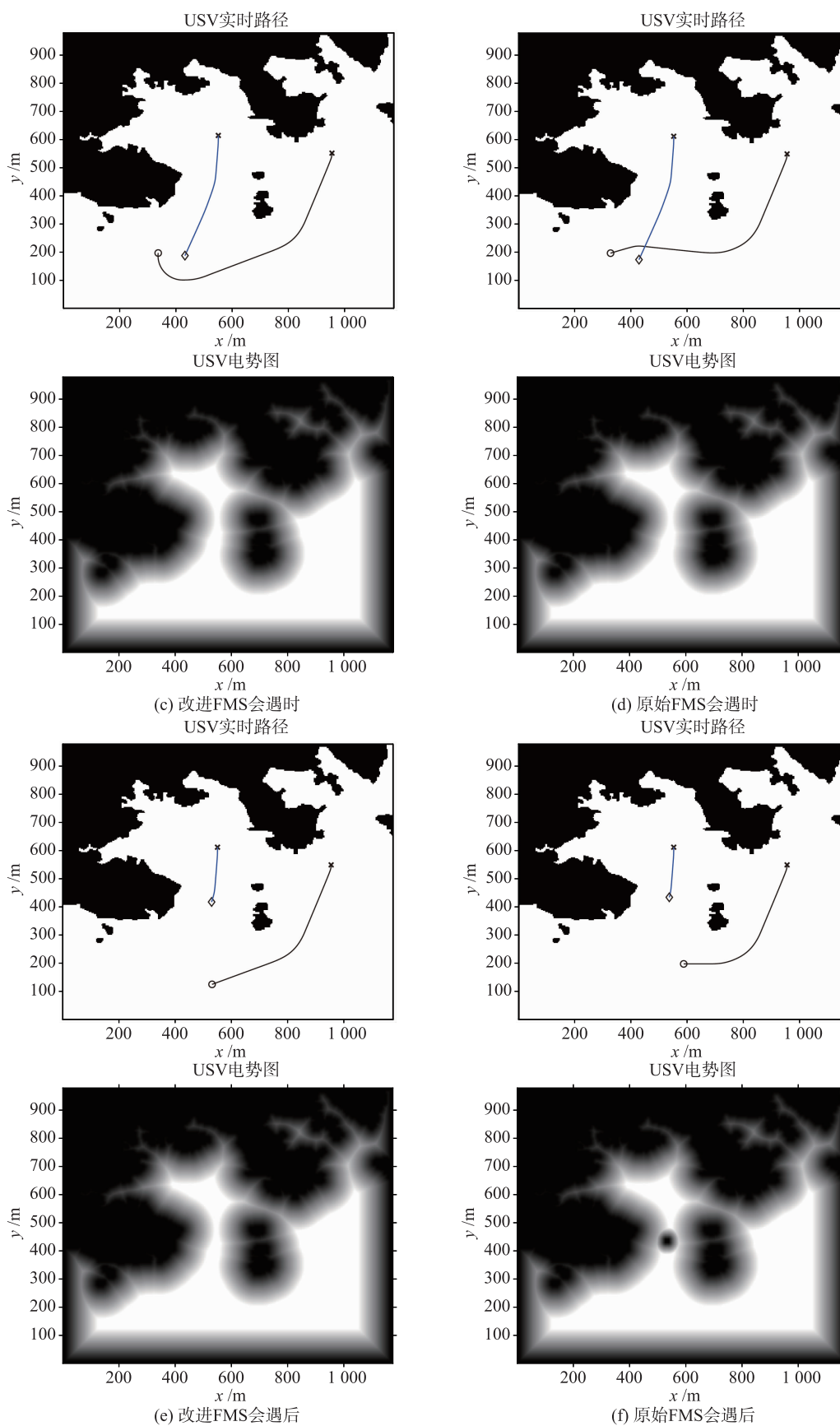


图 10 无人船右舷交叉场景对比结果

Fig.10 Comparison results of the 'crossing from right'

这一点也可通过速度势场图反映出来. 使用原始快速行进平方法进行路径规划时, 当障碍船距离无人船很远时, 速度势场 $W(x)$ 中就已经将障碍船只视为障碍物. 而在无人船实际应用当中, 由于障碍船所在的位置超出了无人船的探测距离, 无人船是无法知道障碍船只的具体信息的, 也无法在速度势场中构建障碍船只的势场. 这一问题在改进后的快速行进平方法中得到了解决, 由图 9 和图 10 可以看出, 当无人船与障碍船会遇前, 无人船没有探测到障碍船只的存在, 因此只根据静态原始环境构建了速度势场, 也只沿全局路径进行航行. 直到障碍船只进入无人船的探测范围后, 无人船才根据探测到的障碍船只信息, 基于本文提出的改进势场法, 构建了新的速度势场 $W'(x)$. 而当二者会遇结束, 障碍船只驶离无人船的探测范围后, 基于改进快速行进平方法构建的速度势场也仅为考虑静态环境的初始势场 $W(x)$, 无人船继续沿全局路径航行直到目标终点. 基于改进后的快速行进平方法进行无人船的路径规划, 极大地减少了需要进行规划的次数, 节约了无人船上的资源, 也有利于无人船控制的稳定性, 适用于无人船在实际中的应用.

而在无人船与障碍船只会遇过程中, 由图 9 和图 10 也可清楚地看出, 无人船沿基于原始快速行进平方法规划所得局部路径航行时, 并未遵循 COLREGS 规定的避碰行为, 而是从障碍船只航行的前方绕行, 这一行为是十分危险, 极有可能造成碰撞. 而基于本文提出的改进快速行进平方法, 由于人为设置的势场 $W_1(x)$ 的存在, 迫使无人船在进行局部路径规划时, 都做出符合 COLREGS 规定的让行行为, 极大地提高了无人船在与其他船只会遇时的安全性.

图 11 所示为水面无人船与障碍船只二者的距离, 在对遇场景和右舷交叉场景下, 二者的最短距离为会遇过程当中的 64.9 m 和 94.4 m, 都大于仿真所设置的会遇安全距离 52 m (10 倍于无人船船长), 由此可以表明, 在出会遇过程中, 无人船具有充分的安全性.

在对遇和右舷交叉两种会遇场景下, 使用原始快速行进平方法和基于本文改进后的快速行进平方法进行路径规划所用时间如表 5 所示. 可以看出, 由于本文提出的基于改进快速行进平方法的水面无人船路径规划算法在没有探测到障碍船只存在时, 仅利用静态环境进行了一次路径规划并将其作为无人船航行的全局路径, 只有当二者会遇才利用快速行进平方法逐步进行规划, 使得无人船在任务执行的过程中, 进行路径规划的次数大大减小. 在两种会遇场景下, 路径规划总体花费的时间分别从 99.97 s 下降到 30.69 s, 以及从 95.91 s 下降到 23.38 s, 下降幅度分别达到了 69.3% 和 75.6%. 减少了路径规划的次数, 也就减小了无人船上资源的占用, 可以将有限的资源分配给其他的控制需要, 有利于满足无人船在实际中的应用需求.

参考文献

- [1] Xie S R, Wu P, Liu H L, et al. A novel method of unmanned surface vehicle autonomous cruise[J]. Industrial Robot, 2016, 43(1): 121-130.
- [2] Yang J M, Tseng C M, Tseng P S. Path planning on satellite images for unmanned surface vehicles[J]. International Journal of Naval Archi-

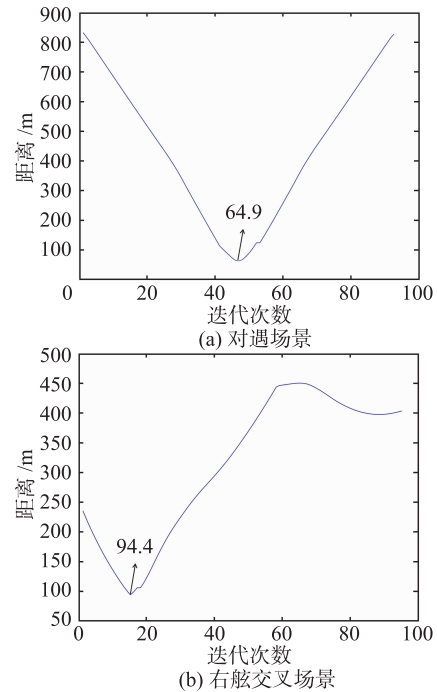


图 11 无人船与障碍船只的距离

Fig.11 Distances between the USV and obstacle ship

表 5 基于两种方法的路径规划所用时间

Tab.5 Time used for path planning based on the two methods

会遇场景	方法	规划时间	降幅
对遇场景	原始 FMS	99.97 s	69.3%
	改进 FMS	30.69 s	
右舷交叉场景	原始 FMS	95.91 s	75.6%
	改进 FMS	23.38 s	

5 结论

本文基于快速行进平方法对水面无人船的路径规划问题进行了研究. 针对目前利用快速行进平方法对智能体进行路径规划的过程中, 无法对使用不同参数 Sat 值时得到的路径进行量化评估这一问题. 本文提出了路径评价函数, 在充分考虑了水面无人船航行的安全性、经济性和控制复杂性等因素下, 对规划所得路径进行评估选择. 另外, 为了提高基于快速行进平方法的水面无人船路径规划在实际应用中的实用性, 对原有速度势场进行了改进, 使无人船在沿改进后的快速行进平方法规划所的路径航行时, 当遇到障碍船后, 可以做出符合 COLREGS 规定的避碰行为. 同时, 基于改进快速行进平方法, 极大地减少了路径规划的时间, 所得到的路径光滑且连续, 在复杂环境下仍具有较高的安全性. 最后, 通过 Matlab 仿真, 验证了本文所提出算法的有效性.

- ecture and Ocean Engineering, 2015, 7(1): 87–99.
- [3] Wang C, Mao Y S, Du K J, et al. Simulation on local obstacle avoidance algorithm for unmanned surface vehicle[J]. International Journal of Simulation Modelling, 2016, 15(3): 460–472.
- [4] Zhang Y, Gong D W, Zhang J H. Robot path planning in uncertain environment using multi-objective particle swarm optimization[J]. Neurocomputing, 2013, 103(1): 172–185.
- [5] 巩敦卫, 耿娜, 张勇. 密集障碍物环境下基于凸包和微粒群优化的机器人路径规划[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(5): 609–616. Gong D W, Geng N, Zhang Y. Robot path planning in environment with dense obstacles based on convex hull and particle swarm optimization[J]. Control Theory and Application, 2012, 5: 609–616.
- [6] 巩敦卫, 耿娜, 张勇. 多地貌环境下的移动机器人路径规划研究[J]. 控制与决策, 2012, 29(5): 708–712. Gong D W, Geng N, Zhang Y. Robot path planning in environment of many terrains[J]. Control and Design, 2012, 29(5): 708–712.
- [7] Fan Y S, Sun X J, Wang G F, et al. On evolutionary genetic algorithm in path planning for an USV collision avoidance[J]. ICIC Express Letters, 2016, 10(7): 1691–1696.
- [8] 陈超, 耿沛文, 张新慈. 基于改进人工势场法的水面无人艇路径规划研究[J]. 船舶工程, 2015, 37(9): 72–75. Chen C, Geng P W, Zhang X C. Path planning research on unmanned surface vessel based on improved potential field[J]. Ship Engineering, 2015, 37(9): 72–75.
- [9] Liu M J, Feng H, Xu H X, et al. Research on autonomous path planning of unmanned surface vehicle in ocean environment[C]//28th International Ocean and Polar Engineering Conference. Sapporo, Japan; ISOPE, 2018: 318–324.
- [10] Liu Y C, Liu W W, Song R, et al. Predictive navigation of unmanned surface vehicles in a dynamic maritime environment when using the fast marching method[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2017, 31(4): 464–488.
- [11] Liu Y C, Richard B, Zhang X Y. The fast marching method based intelligent navigation of an unmanned surface vehicle[J]. Ocean Engineering, 2017, 142(14): 363–376.
- [12] Ulises O R, Oscar M, Roberto S. Mobile robot path planning using membrane evolutionary artificial potential field[J]. Applied Soft Computing Journal, 2019, 77(4): 236–251.
- [13] Pan H, Guo C, Wang Z D. Mobile robot path planning in complicated environment[C]//13th World Congress on Intelligent Control and Automation. Piscataway, USA; IEEE, 2018: 474–478.
- [14] Lyu H, Yin Y. COLREGs – constrained real-time path planning for autonomous ships using modified artificial potential fields[J]. Journal of Navigation, 2019, 72(3): 588–608.
- [15] Liu Y C, Song R, Richard B. A practical path planning and navigation algorithm for an unmanned surface vehicle using the fast marching algorithm[C]//MTS/IEEE OCEANS. Piscataway, USA; IEEE, 2015: 1–7.
- [16] 王跃午. 基于快速行进法的无人艇编队路径规划技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015. Wang Y W. Research on the technologies of path planning for USV formation based on fast marching method[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [17] Javier V G, Alejandro L, Santiago G, et al. Planning robot formations with fast marching square including uncertainty conditions[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(2): 137–152.
- [18] Liu Y C, Richard B. Path planning algorithm for unmanned surface vehicle formations in a practical maritime environment[J]. Ocean Engineering, 2015, 97(5): 126–144.
- [19] Tan G G, Zou J, Zhuang J Y, et al. Fast marching square method based intelligent navigation of the unmanned surface vehicle swarm in restricted waters[J]. Applied Ocean Research, 2020, 95(2): 18–33.
- [20] Liu Y C, Richard B. The angle guidance path planning algorithms for unmanned surface vehicle formations by using the fast marching method[J]. Applied Ocean Research, 2016, 59(6): 327–344.
- [21] Javier V. Advanced applications of the fast marching square planning method[D]. Spain: Carlos III University of Madrid, 2012.
- [22] Sun X J, Wang G F, Fan Y S, et al. An automatic navigation system for unmanned surface vehicles in realistic sea environments[J]. Applied Sciences, 2018, 8(2): 193–220.
- [23] James A S. Level set methods and fast marching methods[M]. New York, USA: Cambridge University Press, 1996.
- [24] Wang Y L, Yu X M, Liang X, et al. A COLREGs-based obstacle avoidance approach for unmanned surface vehicles[J]. Ocean Engineering, 2018, 169(23): 110–124.
- [25] 庄佳园, 万磊, 廖煜雷, 等. 基于电子海图的水面无人艇全局路径规划研究[J]. 计算机科学, 2011, 38(9): 211–214, 219. Zhuang J Y, Wan L, Liao Y L, et al. Global path planning of unmanned surface vehicle based on electronic chart[J]. Computer Science, 2011, 38(9): 211–214, 219.

作者简介

刘 蔚(1985–), 男, 博士, 高级工程师. 研究领域为无人艇编队集群控制技术, 无人艇研制与应用技术.
谈果戈(1992–), 男, 博士生. 研究领域为无人艇运动控制技术, 编队集群控制技术.
邹 劲(1965–), 男, 博士, 研究员. 研究领域为高性能船舶水动力, 无人艇研制与应用技术.