

基于修正导航向量场的 AUV 自主避障方法

姚鹏¹ 解则晓¹

摘要 针对复杂海洋环境下的自治水下机器人 (Autonomous underwater vehicle, AUV) 三维避障问题, 本文提出了一种高效的修正导航向量场方法. 构建自由空间下的初始导航向量场, 引导 AUV 以最短路径向目标点航行. 定义修正矩阵来量化描述障碍物对初始导航向量场的影响, 得到障碍空间下的修正导航向量场, 使得 AUV 向目标点航行的同时躲避静态障碍. 通过结合障碍物运动速度, 分别构建相对初始导航向量场与相对修正导航向量场, 并采取有限时域推演与调整策略, 最终引导 AUV 安全躲避动态障碍. 仿真结果表明, 本方法能较好地应用于复杂海洋环境下的 AUV 避障任务.

关键词 自治水下机器人, 三维避障, 初始导航向量场, 修正导航向量场

引用格式 姚鹏, 解则晓. 基于修正导航向量场的 AUV 自主避障方法. 自动化学报, 2020, 46(8): 1670–1680

DOI 10.16383/j.aas.c180219

Autonomous Obstacle Avoidance for AUV Based on Modified Guidance Vector Field

YAO Peng¹ XIE Ze-Xiao¹

Abstract An efficient method called the modified guidance vector field is proposed to solve the three-dimensional obstacle avoidance problem for autonomous underwater vehicle (AUV) in complex ocean environment. The initial guidance vector field in free space is first constructed to guide AUV to the destination along the shortest path. Then the modulation matrix is defined to quantify the influence of obstacles on the initial guidance vector field, and the modified guidance vector field in obstacle space is hence obtained, where AUV will avoid static obstacles when navigating to the destination. The referred velocity of dynamic obstacles is introduced to construct the relative initial/modified guidance vector field, and the limited time domain based derivation and adjustment strategy is also utilized to guide AUV avoiding dynamic obstacles safely. Finally the simulation results demonstrate that this method applies to the obstacle avoidance mission for AUV well in complex ocean environment.

Key words Autonomous underwater vehicle (AUV), three-dimensional obstacle avoidance, initial guidance vector field, modified guidance vector field

Citation Yao Peng, Xie Ze-Xiao. Autonomous obstacle avoidance for AUV based on modified guidance vector field. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(8): 1670–1680

自治水下机器人 (Autonomous underwater vehicle, AUV) 因具有隐蔽性好、使用灵活、活动范围广等优势, 正逐渐应用于各类军用或民用领域^[1]. 众所周知, 智能化或自主化是未来机器人的本质特征与发展趋势^[2], 而安全避障技术正是提高 AUV 自主航行能力的关键技术之一^[3]. 然而, 相比于无人机、地面机器人等运动平台^[4–5], AUV 所处的海洋环境

更为复杂, 如存在动态洋流、未知海底地形等, 这对 AUV 自主避障技术提出了更大的挑战. 随着人类对海洋的开发不断向深海拓展, 愈加复杂的水下作业环境与 AUV 自主避障能力不足之间的矛盾日益突出, 成为制约 AUV 发展的瓶颈.

本文研究的 AUV 自主避障问题, 是指依据已知环境信息或从传感器 (如前视声呐、高频雷达等) 实时探测的环境信息如障碍信息、洋流信息等, 自主决策 AUV 的三维避障行为, 引导 AUV 向目标点航行的过程中安全躲避各类障碍. 该问题的难点主要体现在环境非结构化 (如包含多种类型的密集水下障碍物、存在非凸区域)、环境动态性 (存在动态洋流、移动威胁等)、环境不确定性 (环境信息部分或完全未知)、三维空间等方面. 经过多年的研究和发展, 虽然 AUV 自主避障技术已取得了一系列研究成果^[2,6–7], 但大多更适用于无障碍或稀疏障碍等简单静态海洋环境下, 而复杂海洋环境下的 AUV 自主

收稿日期 2018-04-16 录用日期 2018-09-21
Manuscript received April 16, 2018; accepted September 21, 2018

山东省自然科学基金 (ZR2018BF016), 中国博士后科学基金 (2017M622278), 中央高校基本科研业务费 (201713046) 资助
Supported by Shandong Provincial Natural Science Foundation of China (ZR2018BF016), China Postdoctoral Science Foundation (2017M622278), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (201713046)

本文责任编辑 朱纪洪
Recommended by Associate Editor ZHU Ji-Hong

1. 中国海洋大学工程学院 青岛 266100
1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100

避障这一基础瓶颈科学问题一直未得到有效的解决.

现有 AUV 避障方法往往借鉴传统的机器人避障策略并考虑了海洋因素影响, 但往往具备一定的局限性, 难以同时兼顾可行性、实时性、复杂环境约束、AUV 性能约束等要求. 从任务空间建模的角度出发, 现有方法主要分为以下五类: 基于图形的方法^[8-9]、空间分解法^[10-12]、随机规划法^[13-14]、数学优化法^[15-16]、人工势场法^[17-19]. 例如, 朱大奇等^[10]在三维栅格地图的基础上, 通过建立三维生物启发神经网络模型来模拟航行空间, 每一个神经元与栅格地图中的位置单元一一对应, 最后根据神经网络中神经元的活性输出值分布情况自主规划 AUV 的安全避障运动路径. Carroll 等^[11]采用四叉树法分解航行空间, 在洋流变化快的区域栅格密集, 而在洋流变化缓慢的区域栅格稀疏, 然后采取 A* 算法寻找最优避障路径, 可同时兼顾算法效率与精确度. Hernández 等^[13]利用传统的快速扩展随机树方法, 并与 anytime 算法、延迟碰撞评估策略相结合, 确定动态未知环境下的 AUV 自主避障行为. 文献^[17]提出了多点人工势场法, 即基于 AUV 当前状态与性能约束构建可行点集合曲面, 进而从离散化的曲面中选取具有最小势场的点作为 AUV 的下一个避障路径点, 该方法相比于传统的人工势场法, 计算量大大降低, 且在一定程度上解决了局部极小问题.

人工势场法 (Artificial potential field, APF) 在障碍物周围形成斥力场, 在目标点位置处形成引力场, 上述两类势场的负梯度即为势场力, 进而可作为机器人运动速度 (包括吸引速度与排斥速度). 由于该方法具有原理简单、计算量小、使用灵活等优势, 经常被用于实时避障问题, 但避障效率有待提升且局部极小问题一直未从本质上得到解决, 此外人工势场法主要应用于二维环境. 产生上述问题的本质是势场函数的定义存在缺陷, 因此国内外学者直接改进上述函数或提出了各种变形方法如电荷法、虚拟力法、流函数法等. 例如, 流函数法^[20]基于流体力学知识构建势场区域, 对速度势求导获得流场流速, 即可作为机器人运动速度, 但该方法只能处理二维流场下的圆形障碍. Wang 等^[21-22]提出一种基于流体计算的无人机三维避障航路规划方法, 通过对三维地形进行流场模拟并进行流线优选, 可获得躲避各类型障碍物的三维最优航路, 但此类方法未考虑风干扰与无人机动力学模型, 且存在计算复杂度高缺陷, 此外尚未将其应用于复杂海洋环境下的 AUV 自主避障问题.

本文受人工势场法的启发, 提出一种基于修正导航向量场 (Modified guidance vector field, MGVF) 的 AUV 自主避障方法, 其本质上可看作人工势场法的一种变形. 该方法利用修正矩阵对初始

导航向量场进行修正, 构建修正导航向量场, 同时结合障碍物运动信息以及考虑洋流影响的 AUV 三维质点模型, 计算 AUV 控制指令, 最终引导 AUV 向目标点航行的同时平滑躲避各类静态或动态障碍物. 相比于传统的人工势场法, MGVF 方法的主要优势如下: 1) MGVF 在给出吸引速度、排斥速度指令的同时引入了切向速度指令, 大大拓展了避障行为的分布, 因此更加适用于三维避障任务 (三个速度矢量的和, 可以表示三维空间下的任意向量), 有效提升了避障效率. 2) 利用统一的障碍物函数代替机器人与障碍物的距离, 该函数不仅与距离有关, 还与障碍物的形状、尺寸等相关, 因此机器人将具有较好的地形跟随特性与较高的避障效率. 3) 本方法数学描述统一、严谨, 可针对安全避障、目标可达等特性给出严格的理论证明.

1 AUV 避障问题建模

1.1 AUV 模型

本文假设 AUV 装有稳定的底层控制系统, 实现对偏航、纵倾、横滚等各姿态角以及速度的稳定保持或跟踪, 因此可采用如下的三自由度质点模型:

$$\begin{cases} \dot{x} = v_r \cos \theta_r \cos \psi_r + v_c \cos \theta_c \cos \psi_c \\ \dot{y} = v_r \cos \theta_r \sin \psi_r + v_c \cos \theta_c \sin \psi_c \\ \dot{z} = v_r \sin \theta_r + v_c \sin \theta_c \\ \dot{\theta}_r = a_{\theta_r} \\ \dot{\psi}_r = a_{\psi_r} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{p} = (x, y, z)^T$ 表示在大地坐标系 $o-x_g y_g z_g$ 下的 AUV 位置, v_r, θ_r, ψ_r 分别为 AUV 相对于洋流的速率、纵倾角、艏向角 (机体坐标系), a_{θ_r}, a_{ψ_r} 表示控制输入, v_c, θ_c, ψ_c 描述了洋流速率与方向, 本文假设 AUV 所处区域的洋流稳定. 定义 v, θ, ψ 为 AUV 在大地坐标系下的航行速率、航迹倾斜角、航迹方位角, 则 AUV 绝对速度 $\mathbf{v} = (v \cos \theta \cos \psi, v \cos \theta \sin \psi, v \sin \theta)^T$ 等于 AUV 相对航行速度 (Water-referenced velocity) $\mathbf{v}_r = (v_r \cos \theta_r \cos \psi_r, v_r \cos \theta_r \sin \psi_r, v_r \sin \theta_r)^T$ 与洋流速度 $\mathbf{v}_c = (v_c \cos \theta_c \cos \psi_c, v_c \cos \theta_c \sin \psi_c, v_c \sin \theta_c)^T$ 的矢量和, 如图 1 所示. 假设速率 v_r 恒定, AUV 状态量或控制输入还需满足如下约束条件:

$$\begin{cases} z \leq z_{\max} \\ \theta_{r, \min} \leq \theta_r \leq \theta_{r, \max} \\ a_{\theta_r, \min} \leq a_{\theta_r} \leq a_{\theta_r, \max} \\ a_{\psi_r, \min} \leq a_{\psi_r} \leq a_{\psi_r, \max} \end{cases} \quad (2)$$

本文采用简单的比例反馈与前馈控制, 来确定各控制输入:

$$\begin{cases} a_{\theta_r} = k_{\theta_r}(\theta_r^d - \theta_r) + \dot{\theta}_r^d \\ a_{\psi_r} = k_{\psi_r}(\psi_r^d - \psi_r) + \dot{\psi}_r^d \end{cases} \quad (3)$$

其中 θ_r^d 、 ψ_r^d 分别表示期望的纵倾角与艏向角指令, 可根据期望航行速度 \mathbf{v}_r^d 计算得到. 角速率指令 $\dot{\theta}_r^d$ 、 $\dot{\psi}_r^d$ 可通过差分获得. 比例系数 k_{θ_r} 、 k_{ψ_r} 为各状态量时间常数的倒数. 设 AUV 的纵倾角误差与艏向角误差为 $e_{\theta_r} = \theta_r^d - \theta_r$ 、 $e_{\psi_r} = \psi_r^d - \psi_r$, 则式 (3) 可写为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{e}_{\theta_r} = -k_{\theta_r} e_{\theta_r} \\ \dot{e}_{\psi_r} = -k_{\psi_r} e_{\psi_r} \end{cases} \quad (4)$$

上式说明 AUV 的纵倾角误差与艏向角误差将以指数形式衰减到 0, AUV 的航行速度 \mathbf{v}_r 可迅速收敛到期望速度 \mathbf{v}_r^d . 因此本文的研究重点是如何获得 \mathbf{v}_r^d .

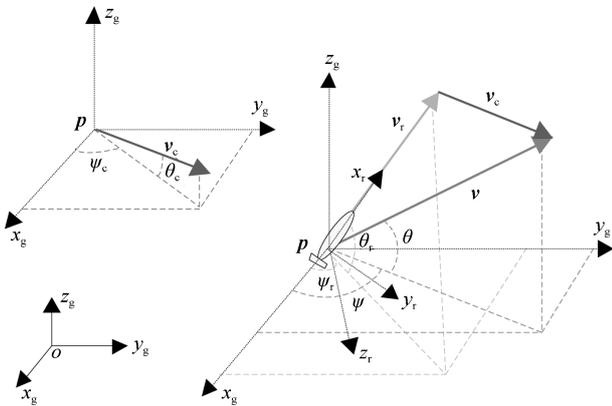


图 1 速度矢量关系图

Fig. 1 Relationship between velocity vectors

1.2 障碍物模型

AUV 航行海域中存在各类型障碍物, 如海底地形、湍急旋涡、大型鱼群、各类水下机器人等, 其中某些障碍物的形状不规则且难以直接处理, 而传感器感知到的障碍物信息也往往不够全面, 如果过分关注地形细节的话, 将大大增加算法计算量, 且对避障效果提升不大. 因此综合考虑计算效率与建模精确度等因素, 利用圆球、圆柱、圆锥、长方体等标准凸多面体来等效各类障碍物包络, 它们具有简单的统一表达式^[21]:

$$\Gamma(\mathbf{p}) = \left(\frac{x-x_0}{a}\right)^{2p} + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^{2q} + \left(\frac{z-z_0}{c}\right)^{2r} \quad (5)$$

其中 (x_0, y_0, z_0) 表示障碍物中心坐标, 系数 a, b, c 和 p, q, r 决定障碍物的尺寸与形状, 通过组合不同系数可获得如图 2 所示的各类典型凸面体.

$\Gamma(\mathbf{p}) < 1$ 、 $\Gamma(\mathbf{p}) = 1$ 、 $\Gamma(\mathbf{p}) > 1$ 分别表示障碍物内部区域、表面区域、外部区域.

按式 (5) 定义的凸面体的三条轴线与坐标轴平行, 但实际环境下凸面体轴线可能与坐标轴不平行, 此时可根据凸面体轴线与各轴的夹角来定义坐标旋转矩阵 Q , 从而将原坐标系转换到新坐标系, 保证建模形式的一致性.

此外, 针对运动障碍物, 本文主要考虑了左转弯、右转弯以及 Singer 加速度模型等三种常见的运动状态, 它们均可写为标准的状态方程 $\mathbf{x}_{t+1} = F_t \mathbf{x}_t + \mathbf{w}_t$, $\mathbf{w}_t \sim N(0, Q_t)$. 以某一维的 Singer 加速度模型为例, 将位置、速度、加速度作为状态量 $\mathbf{x}_t = (x, \dot{x}, \ddot{x})^T$, 则状态转换矩阵 F_t 可定义为^[23]:

$$F_t = \begin{bmatrix} 1 & T & (\alpha T - 1 + e^{-\alpha T})/\alpha^2 \\ 0 & 1 & (1 - e^{-\alpha T})/\alpha \\ 0 & 0 & e^{-\alpha T} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 α 为运动模型相对因子, α 越小, 运动变化越迅速. 当 $\alpha \rightarrow 0$ 时, 该模型可等效为定常加速度模型; 当 $\alpha \rightarrow \infty$ 时, 可等效为定常速度模型. 假设 AUV 已搭载前视避障声呐, 可实时测量障碍物的三维位置信息, 并有如下观测方程 $\mathbf{z}_t = H_t \mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t$, $\mathbf{v}_t \sim N(0, R_t)$. 基于 t 时刻实时观测的障碍物信息, 可采取交互多模型算法^[24] 估计或预测障碍物的未来信息如位置、速度等, 本文不再赘述.

1.3 问题描述

本文将所有障碍物的内部与表面区域定义为禁航区或危险区:

$$\mathbf{R}^F = \bigcup_{k=1}^K \mathbf{R}_k^F, \mathbf{R}_k^F = \{\mathbf{p} | \Gamma_k(\mathbf{p}) \leq 1\} \quad (7)$$

其中 $\Gamma_k(\mathbf{p})$ 表示按式 (5) 定义的第 k 个障碍物方程, K 表示障碍物个数. AUV 自主避障问题是指 AUV 在向目标点航行的过程中始终在禁航区外即 $\mathbf{p} \notin \mathbf{R}^F$, 以保证航行安全, 如图 3 所示.

2 AUV 躲避静态障碍物

自然界水流现象具有如下宏观特征: 在自由环境下 (即无障碍), 水流沿直线流动并到达终点; 在障碍环境下, 水流总能平滑地绕过障碍并最终到达终点. 上述自然现象与 AUV 自主避障具有相似之处, 因此本文提取水流现象的宏观规律并借鉴传统的人工势场法, 提出修正导航向量场方法, 通过将笔直的水流看作初始导航向量场, 将绕过障碍的水流建模为修正导航向量场, 引导 AUV 在向目标点航行的同时安全躲避障碍物.

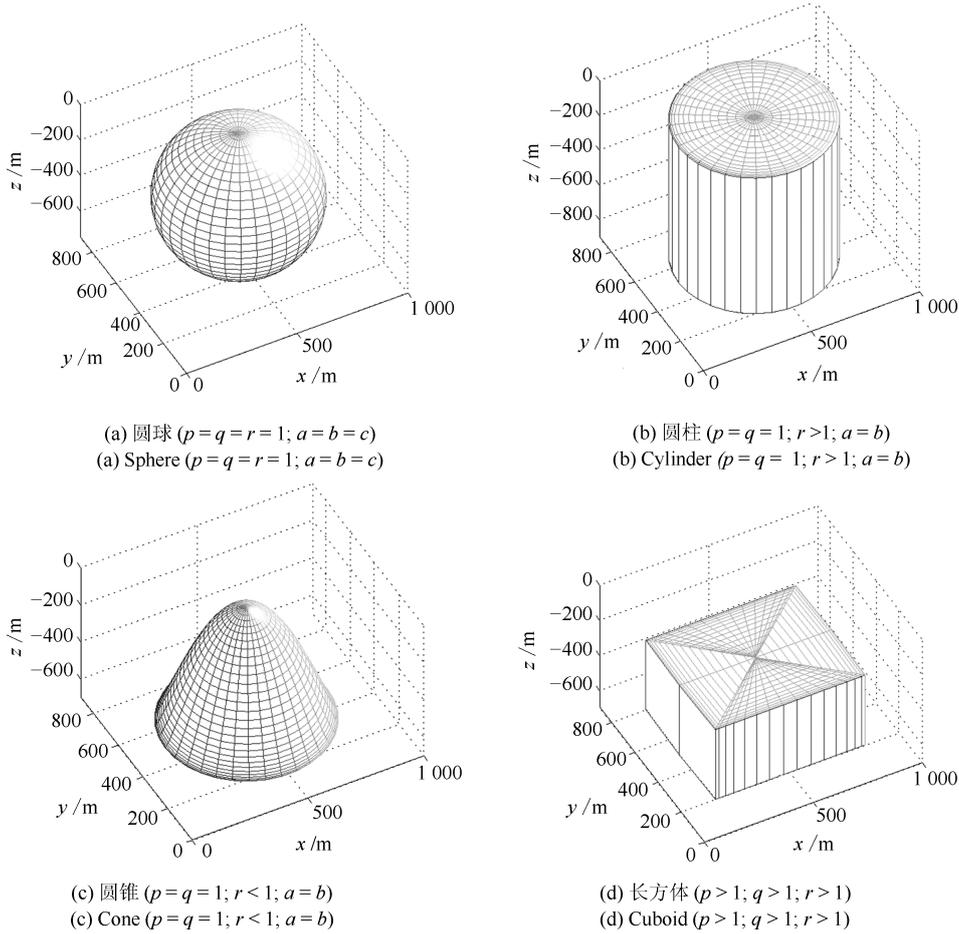


图 2 海洋环境下的典型凸面体障碍物

Fig.2 Convex obstacles in ocean environment

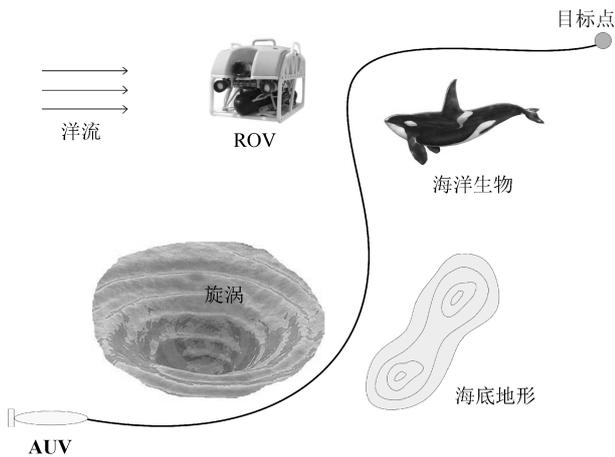


图 3 AUV 自主避障示意图

Fig.3 Illustration of AUV avoiding obstacles

2.1 初始导航向量场

为引导 AUV 最终到达目标点 $\mathbf{p}_d = (x_d, y_d, z_d)$, 在大地坐标系下定义 Lyapunov 距离函数:

$$L = \frac{1}{2}d^2 \tag{8}$$

其中 $d = \sqrt{(x - x_d)^2 + (y - y_d)^2 + (z - z_d)^2}$ 表示 AUV 当前位置与目标点位置的欧氏距离. 为使 Lyapunov 距离函数对时间的导数不大于 0, 即:

$$\frac{dL}{dt} = \left(\frac{\partial L}{\partial x}, \frac{\partial L}{\partial y}, \frac{\partial L}{\partial z} \right) (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})^T = (x - x_d, y - y_d, z - z_d) (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})^T \leq 0 \tag{9}$$

本文定义如下的初始导航向量场, 并将其作为 AUV 在大地坐标系下的期望航行速度:

$$\mathbf{v}^d = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})^T = \frac{-v}{d}(x - x_d, y - y_d, z - z_d)^T \tag{10}$$

然后, AUV 相对于洋流的期望航行速度为 $\mathbf{v}_r^d = \mathbf{v}^d - \mathbf{v}_c$. 由于本文假设洋流速度 \mathbf{v}_c 已知, 且速率 v_r 恒定, 因此通过求解方程 $\|\mathbf{v}_r^d\|_2 = \|\mathbf{v}^d - \mathbf{v}_c\|_2 = v_r$ 即可确定 v , 进而求得 \mathbf{v}_r^d , 最终得到期望的纵倾角指令 θ_r^d 与艏向角指令 ψ_r^d . 按上述定义的初始导航向

量场,可引导 AUV 在考虑洋流的无障碍空间(即自由空间)下沿最短路径到达目标点.

2.2 修正导航向量场

当任务空间中存在障碍物时, AUV 需实现自主安全避障. 本文首先定义修正矩阵 M , 以量化描述所有障碍物对初始导航向量场的综合扰动影响:

$$M = \sum_{k=1}^K \omega_k M_k \quad (11)$$

其中 ω_k 表示第 k 个障碍物的权重系数, 该值取决于 AUV 与障碍物表面的距离、障碍物尺寸与形状等:

$$\omega_k = \begin{cases} 1, & K = 1 \\ \prod_{i=1, i \neq k}^K \frac{(\Gamma_i - 1)}{(\Gamma_i - 1) + (\Gamma_k - 1)}, & K \neq 1 \end{cases} \quad (12)$$

由于 $\omega_{\text{sum}} = \sum_{k=1}^K \omega_k \leq 1$, 因此需归一化处理为

$$\omega_k = \frac{\omega_k}{\omega_{\text{sum}}} \quad (13)$$

M_k 表示第 k 个障碍物的修正矩阵, 定义如下:

$$M_k = I - \frac{\mathbf{n}_k \mathbf{n}_k^T}{|\Gamma_k|^{\frac{1}{\rho_k}} \|\mathbf{n}_k\|_2^2} + \frac{\mathbf{t}_k \mathbf{n}_k^T}{|\Gamma_k|^{\frac{1}{\sigma_k}} \|\mathbf{t}_k\|_2 \|\mathbf{n}_k\|_2} \quad (14)$$

式中 I 为三阶单位矩阵, $\mathbf{n}_k = \left(\frac{\partial \Gamma_k}{\partial x}, \frac{\partial \Gamma_k}{\partial y}, \frac{\partial \Gamma_k}{\partial z} \right)^T$ 表示垂直于障碍物表面向外的径向法向量, \mathbf{t}_k 是切平面(与径向法向量 \mathbf{n}_k 垂直)上的任意切向量, 为简化计算, \mathbf{t}_k 主要在以下四种切向量中进行选择 ($\text{flag} \in \{1, 2, 3, 4\}$):

$$\mathbf{t}_k^{1,2} = \pm \left(\frac{\partial \Gamma_k}{\partial y}, -\frac{\partial \Gamma_k}{\partial x}, 0 \right)^T \quad (15)$$

$$\mathbf{t}_k^{3,4} = \pm \left(\frac{\partial \Gamma_k}{\partial x}, \frac{\partial \Gamma_k}{\partial z}, \frac{\partial \Gamma_k}{\partial y}, \frac{\partial \Gamma_k}{\partial z}, \right. \\ \left. - \left(\frac{\partial \Gamma_k}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial \Gamma_k}{\partial y} \right)^2 \right)^T \quad (16)$$

此外 ρ_k, σ_k 定义如下

$$\rho_k = \rho \cdot e^{1 - \frac{1}{d^l}} \quad (17)$$

$$\sigma_k = \sigma \cdot e^{1 - \frac{1}{d^l}} \quad (18)$$

其中 ρ, σ 为大于 0 的障碍物反应系数, l 表示 AUV 与障碍物表面的距离.

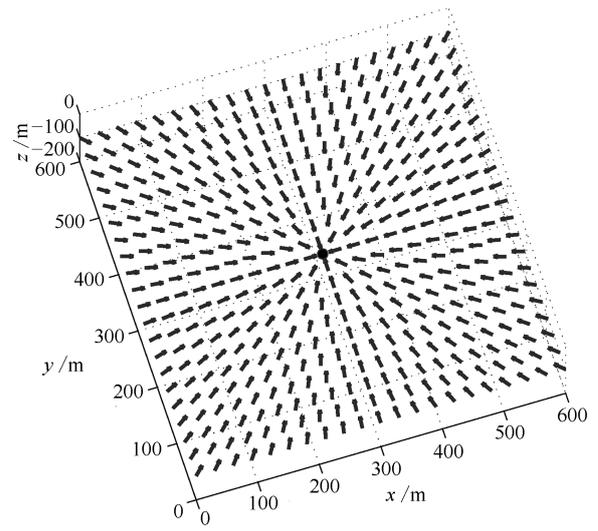
然后, 利用修正矩阵对初始导航向量场进行修正, 即可得到修正导航向量场:

$$\bar{\mathbf{v}}^d = M \mathbf{v}^d \quad (19)$$

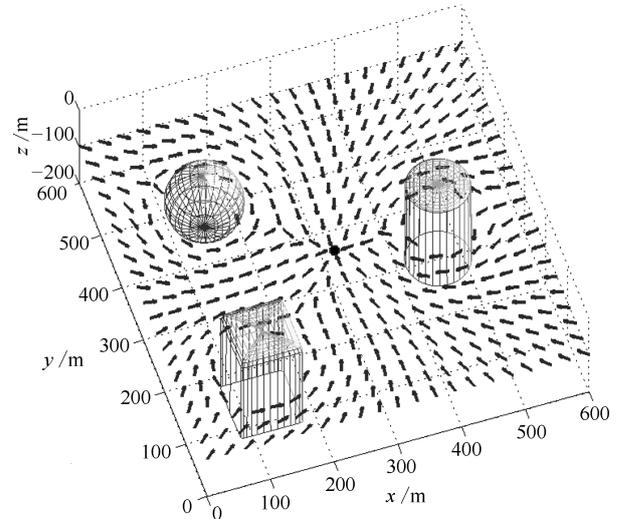
最后, 类似于第 2.1 节, AUV 相对于洋流的期望航行速度为 $\mathbf{v}_r^d = \bar{\mathbf{v}}^d - \mathbf{v}_c$, 最终可得到期望的纵倾角指令 θ_r^d 与艏向角指令 ψ_r^d .

由于径向法向量 \mathbf{n}_k 与切向量 \mathbf{t}_k 是由障碍物函数 Γ_k 的偏导数决定的, 而 Γ_k 不仅取决于 AUV 与障碍物的距离, 还取决于障碍物的形状、尺寸, 因此不同的障碍物尺寸、形状会对导航向量场产生不同的影响. 例如, 障碍物尺寸越大, 它对初始导航向量场的修正作用越强, 则 AUV 偏离初始向量场的避障幅度越大.

假设目标点位于 (300, 300, -100) (m) 且空间内存在三个障碍物, 则初始导航向量场与修正导航向量场的示意图如图 4 所示.



(a) 初始导航向量场
(a) Initial guidance vector field



(b) 修正导航向量场
(b) Modified guidance vector field

图 4 导航向量场示意图

Fig. 4 Illustration of guidance vector fields

定理 1. 修正导航向量场可引导 AUV 安全躲避障碍物, 即任意时刻满足 $\mathbf{p} \notin \mathbf{R}^F$.

证明. 当 AUV 到达第 k 个障碍物表面时, 满足 $\Gamma_k = 1$, 由式 (12)~(13) 可知:

$$\omega_i = \begin{cases} 0, & \forall i \in \{1, \dots, K\}, i \neq k \\ 1, & i = k \end{cases} \quad (20)$$

将上式代入式 (11), 可得 $M = M_k$, 说明此时仅有第 k 个障碍物起修正作用. 然后, 将 $\Gamma_k = 1$ 代入式 (14), 可求得:

$$M = M_k = I - \frac{\mathbf{n}_k \mathbf{n}_k^T}{\|\mathbf{n}_k\|_2^2} + \frac{\mathbf{t}_k \mathbf{n}_k^T}{\|\mathbf{t}_k\|_2 \|\mathbf{n}_k\|_2} \quad (21)$$

因此修正导航向量场可写为:

$$\bar{\mathbf{v}}^d = M \mathbf{v}^d = \mathbf{v}^d - \frac{\mathbf{n}_k^T \mathbf{v}^d}{\|\mathbf{n}_k\|_2^2} \mathbf{n}_k + \frac{\mathbf{n}_k^T \mathbf{v}^d}{\|\mathbf{t}_k\|_2 \|\mathbf{n}_k\|_2} \mathbf{t}_k \quad (22)$$

由于 $\mathbf{n}_k^T \mathbf{t}_k = 0$, 可推知:

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_k^T \bar{\mathbf{v}}^d &= \mathbf{n}_k^T \mathbf{v}^d - \frac{\mathbf{n}_k^T \mathbf{v}^d}{\|\mathbf{n}_k\|_2^2} \mathbf{n}_k^T \mathbf{n}_k + \\ &\frac{\mathbf{n}_k^T \mathbf{v}^d}{\|\mathbf{t}_k\|_2 \|\mathbf{n}_k\|_2} \mathbf{n}_k^T \mathbf{t}_k = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

上式说明期望修正速度 $\bar{\mathbf{v}}^d$ 沿障碍物径向法向量 \mathbf{n}_k 方向的分量为 0, 说明下一时刻 AUV 不会进入障碍物内部即 $\mathbf{p} \notin \mathbf{R}^F$. \square

定理 2. 修正导航向量场不改变原系统即初始导航向量场的稳定性 (即 AUV 最终仍能到达目标点), 即满足 $dL/dt \leq 0$, 且 $\mathbf{p} \rightarrow \mathbf{p}_d$ 时 $\bar{\mathbf{v}}^d \approx \mathbf{v}^d$.

证明. $\bar{\mathbf{v}}^d$ 可写为如下形式

$$\bar{\mathbf{v}}^d = \sum_{k=1}^K \omega_k M_k \mathbf{v}^d = \sum_{k=1}^K \omega_k \bar{\mathbf{v}}_k^d \quad (24)$$

其中 $\bar{\mathbf{v}}_k^d$ 表示第 k 个障碍物产生的修正导航向量场, 依次包括吸引速度、排斥速度、切向速度三部分:

$$\bar{\mathbf{v}}_k^d = \mathbf{v}^d - \frac{\mathbf{n}_k^T \mathbf{v}^d}{|\Gamma_k|^{\frac{1}{\rho_k}} \|\mathbf{n}_k\|_2^2} \mathbf{n}_k + \frac{\mathbf{n}_k^T \mathbf{v}^d}{|\Gamma_k|^{\frac{1}{\sigma_k}} \|\mathbf{t}_k\|_2 \|\mathbf{n}_k\|_2} \mathbf{t}_k \quad (25)$$

由定理 1 可知, AUV 不会进入障碍物内部即 $\Gamma_k \geq 1$ 且 $\cos^2 \langle \mathbf{v}^d, \mathbf{n}_k \rangle \leq 1$, 此外切向速度始终在障碍物外部的切平面上, 通过选取合适的切向量或切向速度, 可推得 $(\mathbf{v}^d)^T \bar{\mathbf{v}}_k^d \geq 0$. 由于 $\omega_k \geq 0$ 恒成立, 因此推得:

$$(\mathbf{v}^d)^T \bar{\mathbf{v}}^d = \sum_{k=1}^K \omega_k (\mathbf{v}^d)^T \bar{\mathbf{v}}_k^d \geq 0 \quad (26)$$

因此, Lyapunov 距离函数对时间的导数满足:

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= (x - x_d, y - y_d, z - z_d) \cdot \bar{\mathbf{v}}^d = \\ &\frac{-d}{v} (\mathbf{v}^d)^T \bar{\mathbf{v}}^d \leq 0 \end{aligned} \quad (27)$$

上式说明修正导航向量场可引导 AUV 逐渐接近目标点.

当 AUV 到达目标点附近即 $\mathbf{p} \rightarrow \mathbf{p}_d$ 时, 由式 (17)~(18) 可知 $\rho_k \rightarrow 0, \sigma_k \rightarrow 0$, 因此推得:

$$M_k \approx I, \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (28)$$

因此可得 $\bar{\mathbf{v}}^d \approx \mathbf{v}^d$, 说明此时 AUV 期望航向指向目标点. \square

定理 3. AUV 不会停滞于障碍物外部或表面区域, 即不存在局部极小点, 即 $\|\bar{\mathbf{v}}^d\|_2 \neq 0$.

证明. 针对第 k 个障碍物, 首先分析 $\bar{\mathbf{v}}_k^d$ 的前两部分即吸引速度与排斥速度, 可知:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{v}^d - \frac{\mathbf{n}_k^T \mathbf{v}^d}{|\Gamma_k|^{\frac{1}{\rho_k}} \|\mathbf{n}_k\|_2^2} \mathbf{n}_k\|_2 &\geq \|\mathbf{v}^d\|_2 - \\ \frac{\mathbf{n}_k^T \mathbf{v}^d}{|\Gamma_k|^{\frac{1}{\rho_k}} \|\mathbf{n}_k\|_2^2} \|\mathbf{n}_k\|_2 &= \|\mathbf{v}^d\|_2 - \frac{\|\mathbf{v}^d\|_2 \cdot |\cos \langle \mathbf{n}_k, \mathbf{v}^d \rangle|}{|\Gamma_k|^{\frac{1}{\rho_k}}} \end{aligned} \quad (29)$$

当 AUV 在外部区域时 $\Gamma_k > 1$, 上式必定大于 0. 当 AUV 在表面区域时 $\Gamma_k = 1$, 上式可能等于 0 (此时吸引速度与排斥速度的大小相等, 但方向相反即 $|\cos \langle \mathbf{n}_k, \mathbf{v}^d \rangle| = 1$), 但通过选取合适的切向量或切向速度可避免此类特殊情况, 进而可使 $\|\bar{\mathbf{v}}_k^d\|_2 > 0$ 始终成立, 因此 $\|\bar{\mathbf{v}}^d\|_2 \neq 0$. \square

3 AUV 躲避动态障碍物

3.1 相对导航向量场

第 2 节仅适用于 AUV 躲避静态障碍物的情形, 而 AUV 航行过程中往往还会遭遇各类运动障碍物, 因此本文引入相对导航向量场的概念, 以引导 AUV 躲避动态障碍.

首先, 根据预测的第 k 个障碍物的实际运动速度 $\mathbf{u}_{k, \text{obs}}$, 定义参考运动速度:

$$\mathbf{v}_{k, \text{obs}} = e^{\frac{-1}{\lambda}(\Gamma_k - 1)} \mathbf{u}_{k, \text{obs}} \quad (30)$$

其中 λ 为正值, 该值越大表明 AUV 躲避动态障碍物的时机越早. 当障碍物离 AUV 较远时, $\mathbf{v}_{k, \text{obs}}$ 将随着指数衰减而迅速减小, 因此引入参考运动速度可避免 AUV 不必要的机动, 从而提高避障效率; 而当障碍物离 AUV 较近时, $\mathbf{v}_{k, \text{obs}}$ 将近似等于实际运动速度, 可保证参考运动速度的准确性.

障碍物的参考运动速度在一定程度上反映了危险等级: 参考运动速度越大, AUV 与障碍物发生碰撞的可能性越大或 AUV 躲避该障碍物的难度越高, 其危险等级越高. 由于各障碍物的运动互不相关甚至可能导致 AUV 的避障行为产生链式效应, 因此难以精确考虑全部运动信息, 为简化计算, 本文从各障碍物的参考运动速度中选取最大值作为总参考运动速度:

$$\mathbf{v}_{\text{obs}} = \mathbf{v}_{k^*, \text{obs}}, k^* = \arg \max_{k \in \{1, \dots, K\}} \|\mathbf{v}_{k, \text{obs}}\|_2 \quad (31)$$

然后, 分别定义相对初始导航向量场 $\mathbf{v}^d - \mathbf{v}_{\text{obs}}$ 与相对修正导航向量场 $\bar{\mathbf{v}}^d - \mathbf{v}_{\text{obs}}$, 由于在相对的导航向量场下移动障碍物是静止的, 因此可将动态问题转化为第 2 节的静态问题来考虑:

$$\bar{\mathbf{v}}^d - \mathbf{v}_{\text{obs}} = M (\mathbf{v}^d - \mathbf{v}_{\text{obs}}) \quad (32)$$

进而得到期望速度 $\bar{\mathbf{v}}^d$:

$$\bar{\mathbf{v}}^d = \mathbf{v}_{\text{obs}} + M (\mathbf{v}^d - \mathbf{v}_{\text{obs}}) \quad (33)$$

通过引入相对导航向量场, 可将动态问题转换为静态问题, 因此 AUV 自主避障与目标可达等特性仍能得到满足.

3.2 避障行为的有限时域推演与调整

虽然修正导航向量场方法可用于实时避障任务, 但往往需预先给出反应系数或选择切向量. 由于 AUV 航行环境往往是动态变化的, 仅依靠固定的反应系数或切向量, 而忽略当前或未来运动态势的话, 往往会因 AUV 动力学性能限制而导致 AUV 躲避障碍物不及时, 甚至出现 AUV 落入凹陷区域 (可看作由若干个障碍物部分重叠产生) 等极端情况, 导致计算失败, 例如, AUV 落入陷阱区域后最终到达两个障碍物的交界处, 障碍物函数同时为 1, 此时无法利用式 (12) 计算权重系数. 此外, 当任务空间内存在多个动态障碍物时, 第 3.1 节为避免链式效应并简化计算, 仅选取了具有最大参考速度的障碍物来代替所有障碍物, 但该策略仅能保证 AUV 躲避危险等级最高的障碍物, 而仍有与其他障碍物发生碰撞的危险. 因此, 需对 AUV 的避障行为进行实时优化或调整.

为解决上述问题, 本文提出了基于避障行为的有限时域推演与调整策略, 通过充分考虑未来运动态势并预留调整余量, 提前确定大致的可行避障行为. 首先, 设定有限步时域 N , 并依据实时探测的障碍物信息预测其未来运动状态; 然后, 采取修正导航向量场法来推演未来 N 步的避障行为; 接着, 对 AUV 的预期航行状态进行评价, 如果出现不满足约束条件, AUV 落入局部凹陷区域, AUV 与动态障碍

物发生碰撞等情况, 需调整障碍物反应系数或重新选择切向量, 直至获得满意的效果. 由式 (25) 可知, 期望航行速度由吸引速度、排斥速度与切向速度组成, 通过选取不同的速度分量, 可以表示三维空间下的任意向量, 因此上述策略简易可行, 满足避障算法的实时性要求.

4 仿真验证

为验证 MGVF 算法的特性, 在 MATLAB 中进行仿真试验. 设定 AUV 最小/最大纵倾角 $\theta_{r, \min} = -30^\circ$, $\theta_{r, \max} = 30^\circ$, 最小/最大控制输入 $a_{\theta_r, \min} = -10^\circ/\text{s}$, $a_{\theta_r, \max} = 10^\circ/\text{s}$, $a_{\psi_r, \min} = -10^\circ/\text{s}$, $a_{\psi_r, \max} = 10^\circ/\text{s}$, 最大下潜深度 $z_{\max} = 200 \text{ m}$, AUV 相对于洋流的航行速率为恒定值 $v_r = 2 \text{ m/s}$. 根据海试实验与历史数据可知, 海洋流场在一定区域与时间段内可看作是恒定的, 本文假设洋流速度始终为 $\mathbf{v}_c = (0.3, 0, 0) \text{ (m/s)}$. 控制参数为 $k_{\theta_r} = 0.1$, $k_{\psi_r} = 0.1$, 时域长度 $N = 10$.

4.1 系数特性分析

假设某 AUV 从起点 $(0, 0, -80) \text{ (m)}$ 出发, 向目标点 $(300, 300, -80) \text{ (m)}$ 航行, 初始艏向角与初始纵倾角分别为 $180^\circ, 0^\circ$. 以单个圆球障碍物为例, 选取不同反应系数或切向量时的 AUV 轨迹如图 5 所示, 它们均能躲避障碍物并最终到达目标点. 此外, 反应系数 ρ 或 σ 越大, AUV 的避障时机越早且幅度越大; 选取水平切向量 ($\text{flag} = 1, 2$) 时, AUV 的水平速度分量越多, 轨迹越趋向右或向左, 而选取垂直切向量 ($\text{flag} = 3, 4$) 时, AUV 的竖直速度分量越多, 轨迹越趋向向上或向下.

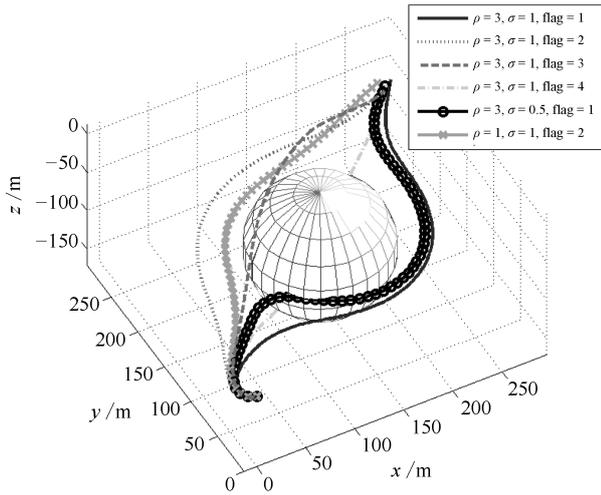
假设任务空间内存在三个圆球障碍物, 且它们互相重叠产生凹陷区域. 选取不同系数或切向量时的 AUV 避障轨迹如图 6 所示. 由于凹陷区域的横向范围大于纵向, 因此选取垂直的切向量更易使 AUV 避开陷阱区域 (如图中实线); 选取水平切向量的话, AUV 往往会落入陷阱区域并与障碍物发生碰撞 (虚线或点线), 此时必须调整反应系数才可能避免上述情况 (点划线). 需注意的是, 在更复杂的场景下, 需同时调整反应系数并选取合适的切向量, 才可能使 AUV 避开陷阱区域.

综上所述, 不同的反应系数或切向量将对 AUV 的避障行为产生较大的影响, 因此需根据任务场景优化选择或调整.

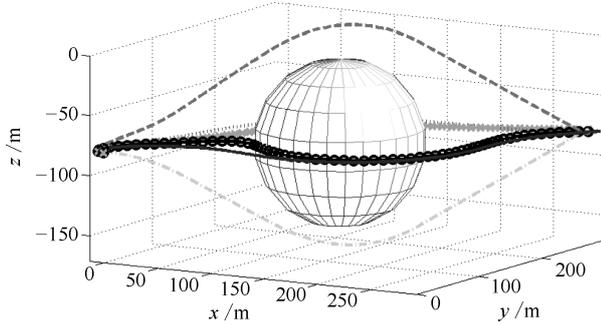
4.2 AUV 躲避动态障碍物

假设 AUV 从起点 $(0, 0, -70) \text{ (m)}$ 出发, 向目标点 $(500, 500, -70) \text{ (m)}$ 航行, 初始艏向角与初始纵倾角分别为 $180^\circ, 0^\circ$. 任务空间内存在一个圆球形

的运动障碍物的一个圆柱形的运动障碍物, 障碍物以及 AUV 的运动轨迹如图 7(a) 所示, AUV 运动过



(a) 三维视图
(a) 3D view



(b) 侧视图
(b) Top view

图 5 AUV 躲避圆球障碍物
Fig. 5 AUV avoiding a sphere obstacle

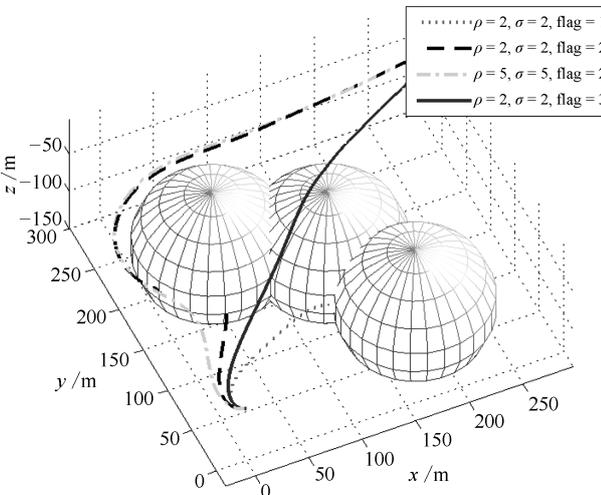
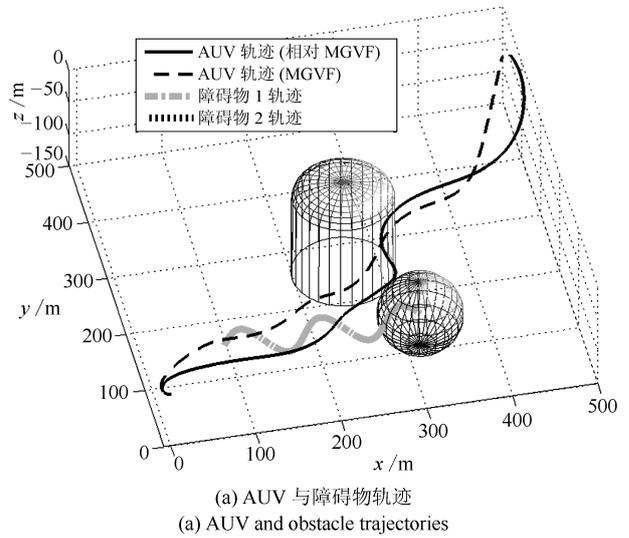


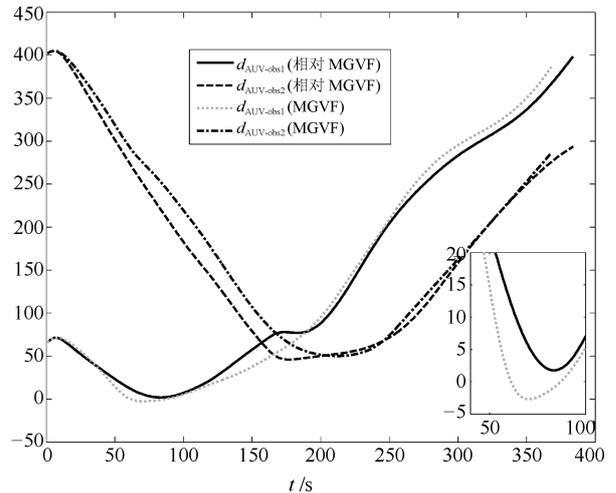
图 6 AUV avoiding concave area
Fig. 6 AUV 躲避凹陷区域

程中与各障碍物表面的距离如图 7(b) 所示. 当采取

第 2 节的静态 MGVF 方法时, 由于未引入障碍物的速度而仅更新障碍物的位置信息, 导致 62s ~ 86s 阶段 AUV 与障碍物 1 表面的距离 $d_{\text{AUV-obs1}}$ 小于 0, 即 AUV 与障碍物 1 发生碰撞; 而采用第 3 节的相对 MGVF 方法, 可在静态 MGVF 的框架内引入障碍物速度信息, 以引导 AUV 有效躲避各类移动障碍 ($d_{\text{AUV-obs1}}$ 、 $d_{\text{AUV-obs2}}$ 始终大于 0). 此外, 图 8 给出了 AUV 部分状态量与控制输入的仿真图, 它们均满足约束条件即式 (2).



(a) AUV 与障碍物轨迹
(a) AUV and obstacle trajectories



(b) AUV 与障碍物表面距离
(b) Distance between AUV and obstacles

图 7 AUV 躲避动态障碍物
Fig. 7 AUV avoiding dynamic obstacles

4.3 复杂场景下 AUV 自主避障

假设 AUV 从起点 (100, 100, -40) (m) 出发, 向目标点 (400, 400, -40) (m) 航行, 初始艏向角与初始纵倾角分别为 $45^\circ, 0^\circ$, 任务空间内存在多个随机生成的障碍物, 采取传统的人工势场法 (APF) 与本文提出的 MGVF 方法进行仿真对

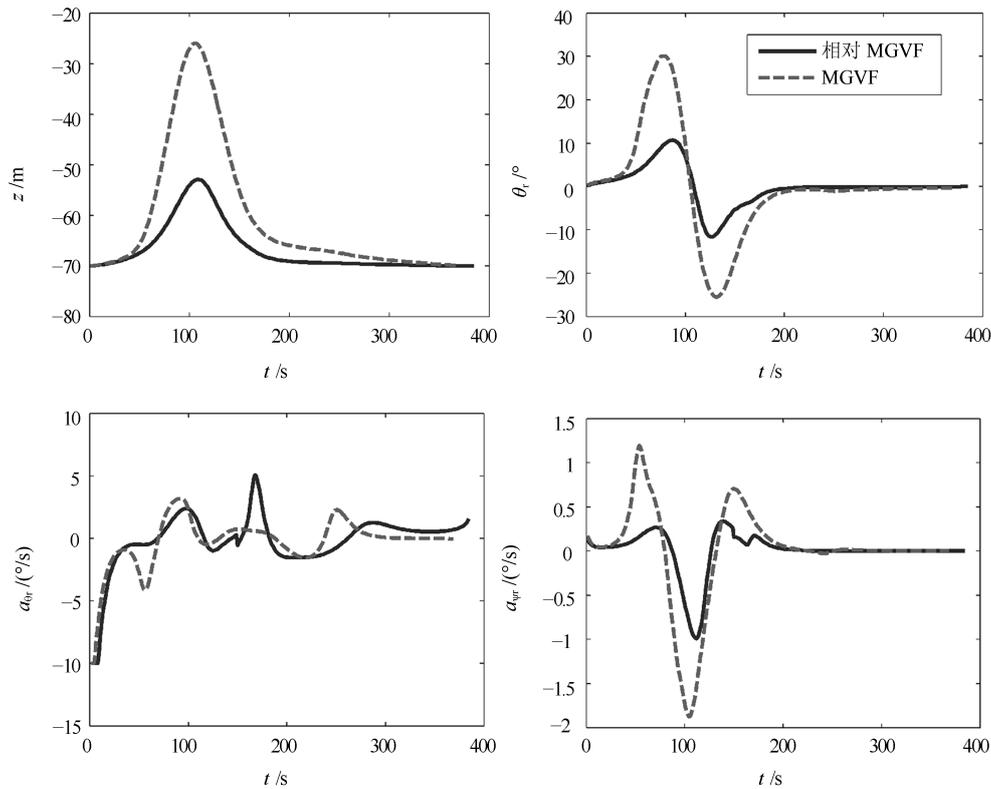


图 8 AUV 部分状态量与控制输入

Fig. 8 AUV state value and control input

比。为公平起见,在定义 APF 的斥力场函数时本文以障碍物函数来代替 AUV 与障碍物表面的距离,其他参数如控制参数等保持一致。此外,由于传统 APF 方法未定义切向场,因此 MGVF 方法仅考虑吸引速度与排斥速度,以保证对比公平。

复杂场景下的 AUV 自主避障结果如图 9 所示。采取上述两种方法, AUV 均能安全避开障碍物并最终到达目标点,此外,经统计各状态量或控制指标均在其约束范围内,满足约束条件。然而基于 MGVF 的 AUV 避障轨迹要比采取 APF 方法的 AUV 轨迹更加平滑,表现为后者在障碍物附近有较大幅度的机动行为,因此采取 MGVF 方法的 AUV 实际航行长度要小于传统 AUV 方法。此外, MGVF 方法可引导 AUV 远离障碍物,更能保证航行安全。

避障轨迹的量化指标如表 1 所示,主要包括轨迹长度 L 、全局平滑度 $GS = \frac{1}{T-2} \sum_{t=2}^{T-1} \langle \mathbf{p}_{t-1}, \mathbf{p}_t, \mathbf{p}_t, \mathbf{p}_{t+1} \rangle$ 、局部平滑度 $LS = \max_{t=2}^{T-1} \langle \mathbf{p}_{t-1}, \mathbf{p}_t, \mathbf{p}_t, \mathbf{p}_{t+1} \rangle$ 、AUV 与障碍物表面的最小距离 $d_{\text{AUV-obs}}^{\min}$ 等^[4],其中 $\mathbf{p}_t, \forall t \in \{1, \dots, T\}$ 表示离散的 AUV 轨迹点。轨迹长度 L 在一定程度上反映了 AUV 能耗,该值越小, AUV 航行效率越高;全局平滑度 GS 表示 AUV 避障轨迹的平均航向角变化值,该值越小,表明全局轨迹越平滑,越易被跟踪;

局部平滑度 LS 表示 AUV 避障轨迹的最大航向角变化值,反映了局部轨迹的平滑度或可行性,该值越小,局部轨迹越易跟踪; $d_{\text{AUV-obs}}^{\min}$ 表示 AUV 的航行安全程度,该值越大,表明 AUV 越安全。显然,采用 MGVF 方法获得的 AUV 轨迹的各项指标更优,因此避障效果更好。

表 1 APF 与 MGVF 方法的量化指标对比

Table 1 Performance indicators of APF and MGVF

方法	L (m)	GS ($^{\circ}$)	LS ($^{\circ}$)	$d_{\text{AUV-obs}}^{\min}$ (m)
APF	488	2.08	14.11	0.3
MGVF	453	1.14	5.56	5.6

5 结论

本文提出了一种基于 MGVF 的 AUV 自主避障方法,通过定义修正矩阵并对初始导航向量场进行修正,可引导 AUV 向目标点航行的同时躲避各类静态或动态障碍物。反应系数或切向量的选取决定了避障轨迹的形状与走向,将在一定程度上影响 AUV 的避障性能。仿真结果表明,相比于传统方法, MGVF 方法在航行距离、轨迹平滑度、避障安全性等方面具有一定的优势,能较好地适应于复杂海洋

环境下的 AUV 自主避障任务. 由于 MGVF 算法的可行性在很大程度上取决于水下测量的可信度, 而本文假设已知理想的测量结果且现有结果仅限于仿真环境, 因此下一步需进行实际环境下的算法测试.

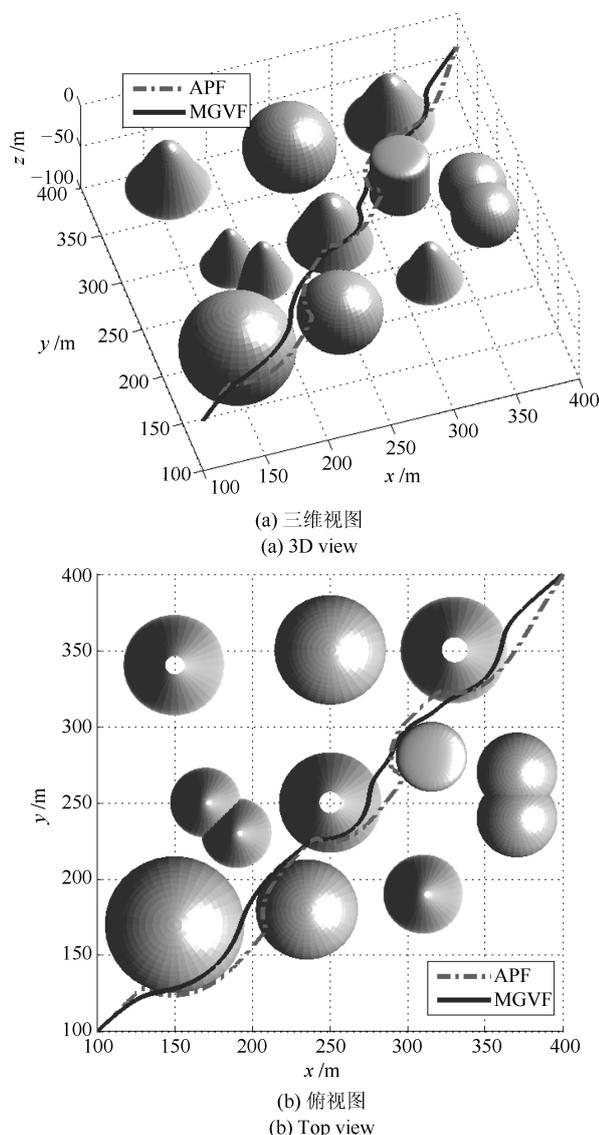


图9 复杂场景下 AUV 自主避障

Fig.9 AUV avoiding obstacles in a complex scenario

References

- Wynn R B, Huvenne V A I, Le Bas T P, Murton B J, Connelly D P, Bett B J, et al. Autonomous underwater vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience. *Marine Geology*, 2014, **352**: 451–468
- Tan Min, Wang Shuo. Research progress on robotics. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(7): 963–972 (谭民, 王硕. 机器人技术研究进展. 自动化学报, 2013, **39**(7): 963–972)
- Zeng Z, Lian L, Sammut K, He F P, Tang Y L, Lammas A. A survey on path planning for persistent autonomy of autonomous underwater vehicles. *Ocean Engineering*, 2015, **110**: 303–313
- Yao P, Wang H L, Su Z K. Real-time path planning of unmanned aerial vehicle for target tracking and obstacle avoidance in complex dynamic environment. *Aerospace Science and Technology*, 2015, **47**: 269–279
- Shen Hao-Yu, Wu Hong-Tao, Chen Bo, Ding Li, Yang Xiao-Long. Obstacle avoidance algorithm for redundant robots based on transition between the primary and secondary tasks. *Robot*, 2014, **36**(4): 425–429 (申浩宇, 吴洪涛, 陈柏, 丁力, 杨小龙. 基于主从任务转化的冗余度机器人避障算法. 机器人, 2014, **36**(4): 425–429)
- Fang M C, Wang S M, Wu M C, Lin Y H. Applying the self-tuning fuzzy control with the image detection technique on the obstacle-avoidance for autonomous underwater vehicles. *Ocean Engineering*, 2015, **93**: 11–24
- Kamil F, Tang S H, Khaksar W, Zulkifli N, Ahmad S A. A review on motion planning and obstacle avoidance approaches in dynamic environments. *Advances in Robotics and Automation*, 2015, **4**(2): 1000134
- Garrido S, Moreno L, Abderrahim M, Martin F. Path planning for mobile robot navigation using voronoi diagram and fast marching. In: Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, China: IEEE, 2006. 2376–2381
- Sgorbissa A, Zaccaria R. Planning and obstacle avoidance in mobile robotics. *Robotics and Autonomous Systems*, 2012, **60**(4): 628–638
- Zhu Da-Qi, Sun Bing, Li Li. Algorithm for AUV's 3-D path planning and safe obstacle avoidance based on biological inspired model. *Control and Decision*, 2015, **30**(5): 798–806 (朱大奇, 孙兵, 李利. 基于生物启发模型的 AUV 三维自主路径规划与安全避障算法. 控制与决策, 2015, **30**(5): 798–806)
- Carroll K P, McClaran S R, Nelson E L, Barnett D M, Friesen D K, William G N. AUV path planning: An A* approach to path planning with consideration of variable vehicle speeds and multiple, overlapping, time-dependent exclusion zones. In: Proceedings of the 1992 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology. Washington, USA: IEEE, 1992. 79–84
- Yan Zhe-Ping, Zhao Yu-Fei, Chen Tao. Three-dimensional path planning for UUV with multiple constraints. *Torpedo Technology*, 2011, **19**(5): 365–369, 375 (严浙平, 赵玉飞, 陈涛. 多约束条件下 UUV 空间航迹规划. 鱼雷技术, 2011, **19**(5): 365–369, 375)
- Hernández J D, Vidal E, Vallicrosa G, Galceran E, Carreras M. Online path planning for autonomous underwater vehicles in unknown environments. In: Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington, USA: IEEE, 2015. 1152–1157
- McMahon J, Plaku E. Mission and motion planning for autonomous underwater vehicles operating in spatially and temporally complex environments. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2016, **41**(4): 893–912

- 15 Ademoye T A, Davari A, Cao W. Three dimensional obstacle avoidance maneuver planning using mixed integer linear programming. In: Proceedings of the 12th IASTED International Conference on Robotics and Applications. Honolulu, USA: ACTA Press, 2006. 180–183
- 16 Chen D S, Batson R G, Dang Y. *Applied Integer Programming: Modeling and Solution*. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 2010.
- 17 Saravanakumar S, Asokan T. Multipoint potential field method for path planning of autonomous underwater vehicles in 3D space. *Intelligent Service Robotics*, 2013, **6**(4): 211–224
- 18 Braginsky B, Guterman H. Obstacle avoidance approaches for autonomous underwater vehicle: Simulation and experimental results. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2016, **41**(4): 882–892
- 19 Li S H, Wang X Y. Finite-time consensus and collision avoidance control algorithms for multiple AUVs. *Automatica*, 2013, **49**(11): 3359–3367
- 20 Waydo S, Murray R M. Vehicle motion planning using stream functions. In: Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei, China: IEEE, 2003. 2484–2491
- 21 Wang H L, Lyu W T, Yao P, Liang X, Liu C. Three-dimensional path planning for unmanned aerial vehicle based on interfered fluid dynamical system. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, **28**(1): 229–239
- 22 Yao Peng, Wang Hong-Lun. Three-dimensional path planning for UAV based on improved interfered fluid dynamical system and grey wolf optimizer. *Control and Decision*, 2016, **31**(4): 701–708
- (姚鹏, 王宏伦. 基于改进流体扰动算法与灰狼优化的无人机三维航路规划. *控制与决策*, 2016, **31**(4): 701–708)
- 23 Kim S, Oh H, Tsourdos A. Nonlinear model predictive coordinated standoff tracking of a moving ground vehicle. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2013, **36**(2): 557–566
- 24 Nadarajah N, Tharmarasa R, McDonald M, Kirubarajan T. IMM forward filtering and backward smoothing for maneuvering target tracking. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, **48**(3): 2673–2678



姚 鹏 中国海洋大学工程学院讲师. 主要研究方向为无人系统路径规划与智能决策, 多机器人协同优化与控制. 本文通信作者.

E-mail: yaopenghappy@163.com

(**YAO Peng** Lecturer at the College of Engineering, Ocean University of China. His research interest covers

path planning and intelligent decision of unmanned system, cooperative optimization and control of multi-robots. Corresponding author of this paper.)



解则晓 中国海洋大学工程学院教授. 主要研究方向为机器视觉与水下三维测量. E-mail: xiezexiao@ouc.edu.cn

(**XIE Ze-Xiao** Professor at the College of Engineering, Ocean University of China. His research interest covers machine vision and underwater 3D measurement technology.)