

8-15-2022

Dynamic Obstacle Avoidance Control of Three-order Multi-robot Cooperative Formation

Yuchao Zhang

School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China,;
17862071035@163.com

Yuan Jiang

School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China,;
jiangyuan@nchu.edu.cn

Jiyang Dai

School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Dynamic Obstacle Avoidance Control of Three-order Multi-robot Cooperative Formation

Abstract

Abstract: Aiming at the obstacle avoidance and consensus control of underwater vehicles formation in a 3D complex environment, a cooperative formation dynamic obstacle avoidance control algorithm is proposed. *An adaptive repulsion gain term based on the speed of dynamic obstacles is established and it is introduced into the repulsion potential field function to enable the robot to safely avoid static and dynamic obstacles. The potential field function based on the gain term of the potential field and the communication weight between the AUVs are defined to solve the robots of easy self collision and leaving the formation. The total acceleration of the AUVs under the action of the potential field is introduced into the consensus protocol, and the formation cooperative obstacle avoidance controller is designed by combining the improved artificial potential field and the consensus theory. The Lyapunov function is used to prove the stable convergence.* The simulation results show that multi-AUV can safely avoid obstacles and achieve the consensus of position and speed with the algorithm.

Keywords

autonomous underwater vehicles(AUV), formation avoidance, artificial potential field, adaptive repulsion gain term, consensus theory

Recommended Citation

Yuchao Zhang, Yuan Jiang, Jiyang Dai. Dynamic Obstacle Avoidance Control of Three-order Multi-robot Cooperative Formation[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(8): 1762-1774.

三阶多机器人协同编队动态避障控制

张玉超, 蒋沅*, 代冀阳

(南昌航空大学 信息工程学院, 江西 南昌 330063)

摘要: 针对智能水下机器人编队在三维复杂环境中的避障和一致性控制问题, 提出了协同编队动态避障控制算法。建立了基于动态障碍物运动速度的自适应斥力增益项, 并将其引入斥力势场函数中, 使机器人安全规避静态及动态障碍物, 定义了基于机间势场增益项和机间通信权重的机间势场函数, 解决机器人易自撞、脱离编队的问题; 将机器人在势场作用下的合加速度引入一致性协议中, 结合改进势场与一致性理论设计编队协同避障控制器; 通过Lyapunov函数方法证明了稳定性。仿真结果表明: 多机器人在该算法下能安全避障并实现位置、速度的一致性。

关键词: 智能水下机器人; 编队避障; 人工势场; 自适应斥力增益项; 一致性理论

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2022)08-1762-13

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0322

Dynamic Obstacle Avoidance Control of Three-order Multi-robot Cooperative Formation

Zhang Yuchao, Jiang Yuan*, Dai Jiyang

(School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Aiming at the obstacle avoidance and consensus control of underwater vehicles formation in a 3D complex environment, a cooperative formation dynamic obstacle avoidance control algorithm is proposed. An adaptive repulsion gain term based on the speed of dynamic obstacles is established and it is introduced into the repulsion potential field function to enable the robot to safely avoid static and dynamic obstacles. The potential field function based on the gain term of the potential field and the communication weight between the AUVs are defined to solve the robots of easy self collision and leaving the formation. The total acceleration of the AUVs under the action of the potential field is introduced into the consensus protocol, and the formation cooperative obstacle avoidance controller is designed by combining the improved artificial potential field and the consensus theory. The Lyapunov function is used to prove the stable convergence. The simulation results show that multi-AUV can safely avoid obstacles and achieve the consensus of position and speed with the algorithm.

Keywords: autonomous underwater vehicles(AUV); formation avoidance; artificial potential field; adaptive repulsion gain term; consensus theory

引言

智能水下机器人 (autonomous underwater vehicles, AUV) 在海洋研究和探索中发挥着重要

作用^[1]。AUV 具有安全性高和隐藏性好等优点, 并且群体 AUV 可以扩大搜索范围, 提高工作效率, 在军事、科学研究、民用等领域的应用也愈加宽泛^[2]。因此, 通过多智能体系统一致性控制

收稿日期: 2021-04-15 修回日期: 2021-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(61663032)

第一作者: 张玉超(1996-), 女, 硕士, 研究方向为多智能体协同控制。E-mail: 17862071035@163.com

通讯作者: 蒋沅(1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为鲁棒控制理论及其应用、智能控制技术及其应用、复杂网络等。

E-mail: jiangyuan@nchu.edu.cn

理论研究AUV的协同控制问题^[3]已成为研究热点。随着水下环境的日益复杂,对多移动机器人编队在水下执行各项任务提出了更高要求,如使机器人在复杂水下环境中既能有效地防止自撞、安全规避静态与动态障碍物,以及避障后能保持编队稳定,又能达到有关状态变量一致的效果。因此,研究AUVs编队避障控制问题具有重要意义。

常见的编队控制方法有领航-跟随法^[4]、虚拟结构法^[5]、基于行为法^[6]和一致性算法等。而针对多机器人编队避障控制的问题,国内外学者进行了深入研究并取得了良好的控制效果。常见的避障控制算法有人工势场法^[7]、神经网络法^[8]和最优化理论算法^[9]等。其中传统人工势场法具有计算简单、实时性强、模型简单等优点,但也存在目标不可达和易陷入局部极小点等问题。针对上述问题,文献[10]提出增设虚拟目标点的方式,解决了机器人易陷入局部极小点的问题;文献[11]在人工势场法中引入距离因子,解决了多智能体之间的距离保持问题;文献[12]将人工势场法和蚁群算法相结合,解决了自主车辆的路径规划、避障等问题;文献[13]提出了一种飞行器路径规划的分层势场算法,解决了目标不可达问题,引入回环力和飞行器间作用力,解决了易收敛到局部极小值问题和飞行器间的碰撞问题。

多智能体一致性理论在编队控制方面的应用逐渐成熟。一致性是指随着时间的推移,多智能体之间通过局部的耦合作用与信息交换实现个体之间的位置、速度等状态趋于一致^[14]。文献[15]基于一致性理论提出事件驱动控制,减少了通信资源浪费和计算资源的消耗;文献[16]结合集值Lyapunov方法和凸性理论,解决了离散多智能体系统的一致性,为一致性研究开拓了新的思路。

根据上述讨论分析可知,大多数改进势场法虽然能解决目标不可达和局部极小等问题,但未

考虑到动态障碍物规避、机间碰撞以及脱离编队的问题。而且多数文献以一阶、二阶系统为主,三阶系统鲜有报道。针对以上问题,本文采用分布式编队控制结构,建立基于三阶积分器的多机器人系统模型,提出协同编队动态避障控制算法,实现静态及动态障碍物规避、机间防撞、位置和速度收敛一致等控制目标。

1 问题描述

1.1 机器人质点模型与系统动态模型

本文主要研究AUVs的编队协同避障控制问题,机器人姿态等控制不做重点研究,所以将每个机器人视为单个智能体,由此建立机器人的三维质点模型:

$$M_{ri} = (x_{ri}, v_{ri}, F_{ri}, d_{ri, \min}, d_{ri, \max}, d_{ri}, v_{ri, \max}) \quad (1)$$

式中: x_{ri} 为机器人空间位置坐标; v_{ri} 为机器人的运动速度; F_{ri} 为人工势场作用下的总合力; $d_{ri, \min}$ 、 $d_{ri, \max}$ 、 d_{ri} 分别为机器人最小、最大可视化距离、最佳编队距离; $v_{ri, \max}$ 为机器人最大运动速度。

建立基于三阶积分器的多机器人系统动态模型。为了不失一般性,本文考虑含有 n 个机器人的编队系统,其中第 i 个机器人的动力学方程表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_{ri}(t) = v_{ri}(t), \\ \dot{v}_{ri}(t) = \mu_{ri}(t), \quad i \in \{1, 2, \dots, n\} \\ \dot{\mu}_{ri}(t) = u_{ri}(t), \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x_{ri} = (x_{rix}, x_{riy}, x_{riz})$ 、 $v_{ri} = (v_{rix}, v_{riy}, v_{riz})$ 、 $\mu_{ri} = (\mu_{rix}, \mu_{riy}, \mu_{riz})$ 、 $u_{ri} = (u_{rix}, u_{riy}, u_{riz})$ 分别为第 i 架机器人的位置、速度、加速度状态,以及控制输入。

当多移动机器人系统中每个机器人对于任意给定的初始状态满足式(3)时,称该系统达到渐进一致。

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \|x_{ri}(t) - x_{rj}(t)\| = 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|v_{ri}(t) - v_{rj}(t)\| = 0, \quad i, j \in \{1, 2, \dots, n\} \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|\mu_{ri}(t) - \mu_{rj}(t)\| = 0, \end{cases} \quad (3)$$

1.2 通信拓扑原理

机器人编队系统通信关系可以用拓扑结构图表示，其中机器人抽象化为节点，机间通信关系视为连边。通信拓扑结构可以用 $G = (V, \varepsilon)$ 表示，其中 $V = \{1, 2, \dots, n\}$ 为所有节点集合， $\varepsilon = V \times V$ 为拓扑图中所有相邻节点间的通信连边； $(i, j) \in \varepsilon$ 为智能体 i, j 之间存在连边关系，各智能体间可传递信息； $A = a_{ij} \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$ 为邻接矩阵 A 为拓扑网络中多机器人之间的连接关系，其中 a_{ij} 为机间通信权重，若节点 i, j 之间存在通信关系，则 $a_{ij} = 1$ ，否则 $a_{ij} = 0$ ，若 $a_{ij} = a_{ji}$ ，则拓扑图 G 称为无向拓扑图。无向图中 $D = \text{diag} \{d_i\}$ 为节点 i 的入度矩阵，且为对角矩阵。拉普拉斯矩阵为 $L = D - A$ ，对于无向图，其矩阵为半正定矩阵，有 n 个实特征值， $0 = \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_n = \lambda_{\max}$ 。对于有向拓扑联通图，如果任何节点之间都能由一条路径联通起来，那么此有向图称为强联通图。

2 编队避障控制器的设计与稳定性分析

在编队避障控制器设计中，针对基于固定无向通信拓扑结构的多机器人编队模型，结合改进人工势场法与一致性理论提出协同编队动态避障控制算法，并通过 Lyapunov 稳定性理论证明了该算法的稳定收敛性。

2.1 传统人工势场

Khatib^[17]提出一种在运动环境中分布有虚拟场的人工势场算法，并将该算法应用于多智能体的路径规划研究中。人工势场法常用于解决多智能体路径规划问题。在统一人工势场框架下，目标点处存在引力势场，多智能体通过目标点对其产生的引力作用朝目标点方向移动；同时障碍物周围存在斥力势场，障碍物产生的斥力作用阻碍多智能体朝障碍物方向移动，多智能体最终在合力的作用下逐步地到达目标点位置。传统势场法原

理示意图如图1所示。

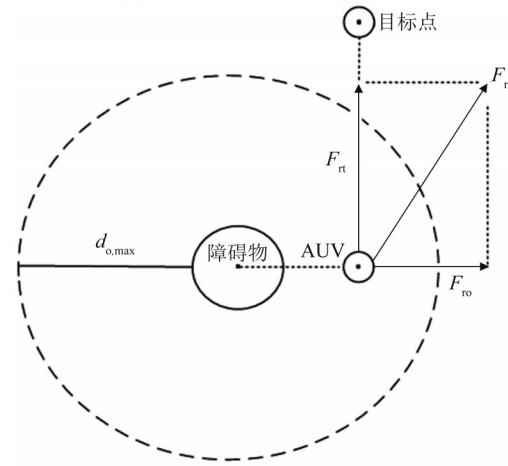


图1 传统势场法

Fig. 1 Traditional potential field method

传统势场法中的引力势场函数和斥力势场函数分别为

$$U_{rt}(x_r) = \frac{1}{2} \alpha_{rt} \|x_r - x_t\|^2 \quad (4)$$

$$U_{ro}(x_r) = \begin{cases} \frac{1}{2} \beta_{ro} \left(\frac{1}{\|x_r - x_o\|} - \frac{1}{d_o} \right)^2, & \|x_r - x_o\| \leq d_o \\ 0, & \|x_r - x_o\| > d_o \end{cases} \quad (5)$$

式中： α_{rt} 和 β_{ro} 分别为引力增益系数和斥力增益系数； $\|x_r - x_t\|$ 、 $\|x_r - x_o\|$ 分别为机器人到目标点和障碍物的距离； d_o 为障碍物斥力势场对机器人的影响距离。

分别对式(4)~(5)求负梯度可得到虚拟引力和斥力：

$$F_{ro}(x_r) = -\nabla U_{rt}(x_r) = -\alpha_{rt} \|x_r - x_t\| \quad (6)$$

$$F_{ro} = -\nabla U_{ro}(x_r) =$$

$$\begin{cases} \frac{\beta_{ro}}{\|x_r - x_o\|^2} \left(\frac{1}{\|x_r - x_o\|} - \frac{1}{d_o} \right), & \|x_r - x_o\| \leq d_o \\ 0, & \|x_r - x_o\| > d_o \end{cases} \quad (7)$$

机器人在统一势场下受到的合力为

$$F_r(x_r) = F_{rt}(x_r) + F_{ro}(x_r) \quad (8)$$

式中： $F_{rt}(x_r)$ 为引力； $F_{ro}(x_r)$ 为斥力； $F_r(x_r)$ 为合力。

综上所述, 当用传统人工势场法对多机器人进行路径规划时容易出现的问题, 譬如, 因目标点周围存在多个障碍物, 合斥力过大导致机器人无法到达目标点; 斥力势场函数中未考虑动态障碍物的运动速度, 机器人无法规避动态障碍物; 机器人容易因合力为零陷入局部极小点; 多个机器人协同行进时因未考虑机间作用力而发生自撞或脱离编队。

2.2 改进人工势场

本节是对传统势场函数进行改进, 首先是改进障碍物斥力势场函数, 使机器人能对移动障碍物进行规避; 其次改进机间作用力, 能自适应地调节机间编队距离, 避免机间碰撞。改进后, 势场力主要包括障碍物斥力、机间势场力、目标引力和辅助力。

2.2.1 障碍物斥力势场

为解决水下多智能机器人对动态障碍物的规避问题, 设计了新的斥力势场函数, 并引入动态障碍物斥力势场作用范围以及基于动态障碍物运动速度的自适应斥力增益项, 使得移动机器人在环境中出现的动态、静态障碍物都能有效规避。

重新定义斥力势场函数:

$$U_{roi}(x_{ri}) = \begin{cases} \frac{1}{2} \beta_{ro}(\rho) \left(\frac{\|x_{ri} - x_{op}\|}{d_{o,max}^2} - \frac{2 \ln \|x_{ri} - x_{op}\|}{d_{o,max}} - \frac{1}{\|x_{ri} - x_{op}\|} \right), \\ \|x_{ri} - x_{op}\| \in [d_1, d_2] \\ +\infty, \|x_{ri} - x_{op}\| \in [0, d_{o,min}] \\ 0, \text{ else} \end{cases} \quad (9)$$

对式(9)求负梯度, 得斥力函数:

$$F_{roi}(x_{ri}) = -\nabla U_{roi}(x_{ri}) = \begin{cases} \frac{1}{2} \beta_{ro}(\rho) \left(-\frac{1}{d_{o,max}^2} + \frac{2}{d_{o,max} \|x_{ri} - x_{op}\|} - \frac{1}{\|x_{ri} - x_{op}\|^2} \right), \\ \|x_{ri} - x_{op}\| \in [d_1, d_2] \\ +\infty, \|x_{ri} - x_{op}\| \in [0, d_{o,min}] \\ 0, \text{ else} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\beta_{ro}(\rho) = \begin{cases} 1, \|v_o\| = 0 \\ 1 + e^{\|v_o\|/\rho}, \text{ else} \end{cases}$ 为自适应斥力增益

项; x_{op} 为机器人与障碍物间的连线和障碍物表面的交点; $\|x_{ri} - x_{op}\|$ 为机器人与交点的距离; $\rho = \lceil \lceil \|x_{ri} - x_{op}\| \rceil \rceil$ 为对 $\|x_{ri} - x_{op}\|$ 取整; $d_1 = \max\{d_{o,max}, d_{r,max}\}$, $d_2 = \min\{d_{o,min}, d_{r,min}\}$, $d_{r,min}$ 与 $d_{r,max}$ 分别为机器人最小、最大可视化距离; $d_{o,max}$ 与 $d_{o,min}$ 分别为障碍物最大、最小影响距离; $\|v_o\|$ 为障碍物的移动速度, 且设定为常值, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 。

当障碍物速度为0时表示为静态障碍物, 此时自适应斥力增益项为1。当机器人在动态障碍物斥力势场的作用范围内, 随着动态障碍物与机器人之间距离增大, 自适应斥力增益项随之减小, 从而动态斥力减小; 随着动态障碍物与机器人之间距离减小, 自适应斥力增益项随之增大, 从而动态斥力增大。

2.2.2 机间势场

为了解决机器人之间因机间距离过小发生相互碰撞以及因机间距离过大而脱离编队的问题, 本文考虑机与机之间作用力的影响范围, 定义了一种考虑基于机间距离的增益项和机间通信权重的机间势场函数。改进后的机间势场函数包括机间引力势场函数和机间斥力势场函数, 其中机间引力势场函数为

$$U_{rij}(x_{ri}) = \begin{cases} \sum a_{ij} \frac{1}{2} \alpha_{rij}(\rho) \|x_{ri} - x_{rj}\|^2, \\ \|x_{ri} - x_{rj}\|_{\min} > d_r \text{ and } \|x_{ri} - x_{rj}\| \in R \\ 0, \|x_{ri} - x_{rj}\| \notin R \end{cases} \quad (11)$$

其中: $\alpha_{rij}(\rho) = 1 + e^\rho$; R 为机间势场力影响范围。

对式(11)求负梯度得机间引力:

$$F_{rij}(x_{ri}) = -\nabla U_{rij}(x_{ri}) = \begin{cases} -\sum a_{ij} \alpha_{rij}(\rho) \|x_{ri} - x_{rj}\|, \\ \|x_{ri} - x_{rj}\|_{\min} > d_r \text{ and } \|x_{ri} - x_{rj}\| \in R \\ 0, \|x_{ri} - x_{rj}\| \notin R \end{cases} \quad (12)$$

改进后的机间斥力势场函数为

$$U_{ij}(x_{ri}) = \begin{cases} \sum a_{ij} \frac{1}{2} \beta_{rij}(\rho) \left(\frac{1}{\|x_{vj} - x_{ri}\|} - \frac{1}{d_r} \right)^2, & \|x_{vj} - x_{ri}\|_{\min} < d_r \text{ and } \|x_{vj} - x_{ri}\| \in R \\ 0, & \|x_{vj} - x_{ri}\| \notin R \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\beta_{rij}(\rho) = 1 + e^{-\rho}$.

对式(13)求负梯度得机间斥力:

$$F_{rij}(x_{ri}) = -\nabla U_{ij}(x_{ri}) = \begin{cases} \sum a_{ij} \frac{\beta_{rij}(\rho)}{\|x_{vj} - x_{ri}\|^2} \left(\frac{1}{\|x_{vj} - x_{ri}\|} - \frac{1}{d_r} \right), & \|x_{vj} - x_{ri}\|_{\min} < d_r \text{ and } \|x_{vj} - x_{ri}\| \in R \\ 0, & \|x_{vj} - x_{ri}\| \notin R \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\rho = [\|x_{vj} - x_{ri}\|]$ 为对 $\|x_{vj} - x_{ri}\|$ 取整; $\|x_{vj} - x_{ri}\|$ 为第*i*个机器人和第*j*个机器人的距离; d_r 为机间最佳编队距离; $\alpha_{ij}(\rho)$ 与 $\beta_{rij}(\rho)$ 分别为自适应机间引力增益项和自适应机间斥力增益项; a_{ij} 为机间通信权重。

由式(12)可得, 当机间距离大于最佳编队距离时, 机与机之间表现为引力, 且随着机间距离的增大, 机间引力增大; 由式(14)可得, 当机间距离小于最佳编队距离时, 机与机之间表现为斥力, 且随着机间距离减小, 机间斥力增大。因而可以根据机与机之间的距离自适应地调节机间势场函数, 从而避免机间碰撞和脱离编队的情况。

对于传统势场法的目标不可达问题以及机器人易陷入局部极小值问题, 本文不再做重点研究, 仍采用文献[18]中的改进方法。即在由分段原理修正的引力势场函数中引入引力影响因子解决目标不可达问题。采用文献[18]中引入辅助力的方法解决传统势场法中机器人易陷入局部极小值点的问题。其中辅助力大小根据当前计算的引力和合斥力决定。本文只给出该引力和辅助力的表达式和示意图分别如公式(16)、(17)和图2所示。

$$U_{rti}(x_{ri}) =$$

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \alpha_{rt1} \|x_{ri} - x_t\|^2 \|x_{ri} - x_{op}\|^m, & \|x_{ri} - x_t\| < d_r \\ \frac{1}{2} \alpha_{rt1} \|x_{ri} - x_t\|^2 \|x_{ri} - x_{op}\|^m, & \|x_{ri} - x_t\| \geq d_r \end{cases} \quad (15)$$

对式(15)求负梯度得引力函数为

$$F_{rti}(x_{ri}) = -\nabla U_{rti}(x_{ri}) = \begin{cases} -\alpha_{rt1} \|x_{ri} - x_t\| \|x_{ri} - x_{op}\|^m - \frac{m\alpha_{rt1}}{2} \|x_{ri} - x_t\|^2 \|x_{ri} - x_{op}\|^{m-1}, & \|x_{ri} - x_t\| < d_r \\ -\alpha_{rt2} \|x_{ri} - x_{op}\| \|x_{ri} - x_{op}\|^m - \frac{m\alpha_{rt2}}{2} \|x_{ri} - x_t\|^2 \|x_{ri} - x_{op}\|^{m-1}, & \|x_{ri} - x_t\| > d_r \end{cases} \quad (16)$$

式中: α_{rt1} 和 α_{rt2} 为引力增益系数; $\|x_{ri} - x_t\|$ 和 $\|x_{ri} - x_{op}\|$ 分别为机器人到目标点和交点的距离。

$$F_{rci}(x_{ri}) =$$

$$\begin{cases} \delta (\|F_{ro}(x_{ri})\| + \|F_{rt}(x_{ri})\|) \cdot \frac{F_{rt}(x_{ri}) F_{ro}^2(x_{ri})}{\|F_{rt}(x_{ri}) F_{ro}^2(x_{ri})\|} \frac{F_{rt}(x_{ri})}{\|F_{rt}(x_{ri})\|}, & \|x_{ri} - x_{op}\| \leq \xi d_{o, \min} \\ 0, & \|x_{ri} - x_{op}\| > \xi d_{o, \min} \end{cases} \quad (17)$$

式中: δ 为辅助力增益系数; ξ 为辅助力影响距离系数。

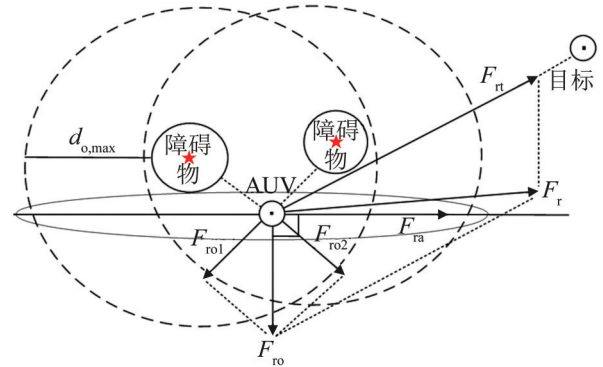


图2 辅助力
Fig. 2 Auxiliary force

综上, 机器人在各个势场作用下产生的合力为

$$F_{ri}(x_{ri}) = F_{roi}(x_{ri}) + F_{rij}(x_{ri}) + F_{rti}(x_{ri}) + F_{rci}(x_{ri}) \quad (18)$$

机器人在各个势场力作用下的加速度为

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{roi}(i, 0) = \frac{F_{roi}(x_{ri})}{m_{ri}}, \\ a_{rti}(i, t) = \frac{F_{rti}(x_{ri})}{m_{ri}}, \\ a_{yji}(i, j) = \frac{F_{yji}(x_{ri})}{m_{ri}}, \\ a_{rci}(i) = \frac{F_{rci}(x_{ri})}{m_{ri}}, \end{array} \right. i, j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (19)$$

将以上各个加速度叠加产生机器人在统一势场环境中的合加速度, 可称该过程为加速度融合, 从而设计基于改进人工势场法的机器人编队避障控制律:

$$\begin{aligned} a_{ri}(t) = & \sum_{o=1}^d a_{roi}(i, 0) + \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{yji}(i, j) + \\ & \sum_{t=1}^n a_{rti}(i, t) + \sum_{i=1}^n a_{rci}(i), i, j \in \{1, 2, \dots, n\} \end{aligned} \quad (20)$$

式中: $a_{roi}(i, 0)$ 、 $a_{yji}(i, j)$ 、 $a_{rti}(i, t)$ 、 $a_{rci}(i)$ 分别为移动机器人在斥力势场、机间势场、引力势场、辅助力势场作用下产生的加速度。

2.3 编队避障控制器设计

一致性基本控制协议为

$$u_{ri}(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} [(x_{rj}(t) - x_{ri}(t)) + \gamma_0 (v_{rj}(t) - v_{ri}(t))] \quad (21)$$

式中: γ_0 为有界的控制增益。

基本一致性协议的位置信息差可使所有机器人收敛到同一位置, 并未考虑最佳编队距离。但在实际机器人编队控制中必须考虑机与机之间存在一定的安全距离, 所以需对位置协同变量做进一步改进。因此, 基于式(21)结合本文构建的三阶多机器人编队系统, 引入编队中心参考向量, 并用机器人的实际位置减去该参考向量得到新的位置协同变量; 引入机器人的期望速度, 用机器人的实际速度减去该期望速度得到新的速度协同变量, 引入机器人在改进的人工势场作用下产生的合加速度, 由机器人与其相邻机器人的位置信息

差、速度信息差以及加速度信息差更新机器人的位置、速度以及加速度等状态信息。

根据上述分析, 对于编队内的所有机器人, 为达到编队协同避障的控制目标, 提出针对多移动机器人系统的协同编队动态避障控制策略:

$$u_{ri}(t) = - \sum_{j=1}^n a_{ij} [\gamma_1 (\hat{x}_{rj}(t) - \hat{x}_{ri}(t)) + \gamma_2 (\hat{v}_{rj}(t) - \hat{v}_{ri}(t)) + \gamma_3 (a_{rj}(t) - a_{ri}(t))] + F_{ri}(t), i, j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (22)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{x}_{ri}(t) = x_{ri}(t) - x'_{ri}, \\ \hat{v}_{ri}(t) = v_{ri}(t) - v'_{ri}, \end{array} \right. i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (23)$$

式中: $\gamma_1 > 0$ 、 $\gamma_2 > 0$ 、 $\gamma_3 > 0$ 为一致性控制增益; a_{ij} 为机器人之间的通信权重, 本文定义各个机器人之间的通信权重相等, 且数值均设为1; $F_{ri}(t)$ 为机器人在势场中所受合力, 具体定义为 $F_{ri}(t) = -\nabla_{x_{ri}} U(x_{ri}(t))$ 。 $\hat{x}_{ri}(t)$ 与 $\hat{v}_{ri}(t)$ 分别为机器人实际位置、实际速度与编队参考向量 x'_{ri} 、期望速度 v'_{ri} 的差值。

机器人满足的初始状态条件为 $[x_{ri}(0), v_{ri}(0), a_{ri}(0)]^T$ 。假设向量 $\hat{x}_{ri}(t)$ 、 $\hat{v}_{ri}(t)$ 、 $a_{ri}(t)$ 定义为

$$\begin{aligned} \hat{x}_{ri}(t) &= [\hat{x}_{r1}^T(t), \hat{x}_{r2}^T(t), \dots, \hat{x}_{rn}^T(t)] \in \mathbb{R}^{n \times 3} \\ \hat{v}_{ri}(t) &= [\hat{v}_{r1}^T(t), \hat{v}_{r2}^T(t), \dots, \hat{v}_{rn}^T(t)] \in \mathbb{R}^{n \times 3} \\ a_{ri}(t) &= [a_{r1}^T(t), a_{r2}^T(t), \dots, a_{rn}^T(t)] \in \mathbb{R}^{n \times 3} \end{aligned} \quad (24)$$

将式(24)代入式(2)可得机器人运动学模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\hat{x}}_{ri}(t) = v_{ri}(t), \\ \dot{\hat{v}}_{ri}(t) = \mu_{ri}(t), \\ \dot{\mu}_{ri} = - \sum_{j=1}^n a_{ij} [\gamma_1 (\hat{x}_{rj}(t) - \hat{x}_{ri}(t)) + \gamma_2 (\hat{v}_{rj}(t) - \hat{v}_{ri}(t)) + \gamma_3 (a_{rj}(t) - a_{ri}(t))] + F_{ri}(t), \\ i \in \{1, 2, \dots, n\} \end{array} \right. \quad (25)$$

那么整个机器人编队系统的控制输入可以重写为

$$\dot{\mu}_{ri}(t) = -\gamma_1 L \hat{x}_{ri}(t) - \gamma_2 L \hat{v}_{ri}(t) - \gamma_3 L a_{ri}(t) + F_{ri}(t) \quad (26)$$

移动机器人的 x'_{ri} 、 v'_{ri} 在分离情况下, 式(26)的控制输入可改写为

$$\dot{\boldsymbol{\mu}}_{ri}(t) = -\gamma_1 \mathbf{L} \mathbf{x}_{ri}(t) - \gamma_2 \mathbf{L} \mathbf{v}_{ri}(t) - \gamma_3 \mathbf{L} \boldsymbol{\mu}_{ri}(t) + \gamma_1 \mathbf{L} \mathbf{x}'_{ri} + \gamma_2 \mathbf{L} \mathbf{v}'_{ri} + F_{ri}(x) \quad (27)$$

其中，移动机器人系统的拉普拉斯矩阵为

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n a_{1j} & -a_{12} & \cdots & -a_{1n} \\ -a_{21} & \sum_{j=1}^n a_{2j} & \cdots & -a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{n1} & -a_{n2} & \cdots & \sum_{j=1}^n a_{nj} \end{bmatrix} \quad (28)$$

因此，在控制协议式(22)的作用下，移动机器人编队系统的运动学模型可以用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_{ri}(t) \\ \dot{\mathbf{v}}_{ri}(t) \\ \dot{\boldsymbol{\mu}}_{ri}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_n & \mathbf{I}_n & \mathbf{0}_n \\ \mathbf{0}_n & \mathbf{0}_n & \mathbf{I}_n \\ -\gamma_1 \mathbf{L} & -\gamma_2 \mathbf{L} & -\gamma_3 \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{ri}(t) \\ \mathbf{v}_{ri}(t) \\ \boldsymbol{\mu}_{ri}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_n \\ \mathbf{0}_n \\ F_{ri}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_n & \mathbf{0}_n & \mathbf{0}_n \\ \mathbf{0}_n & \mathbf{0}_n & \mathbf{0}_n \\ \gamma_1 \mathbf{L} & \gamma_2 \mathbf{L} & \gamma_3 \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}'_{ri} \\ \mathbf{v}'_{ri} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (29)$$

系统满足的初始状态条件为 $[\mathbf{x}_{ri}(0), \mathbf{v}_{ri}(0), \mathbf{a}_{ri}(0)]^T$ ，其中初始位置条件为 $\mathbf{x}_{ri}(0) = [\mathbf{x}_{r1}^T(0), \mathbf{x}_{r2}^T(0), \dots, \mathbf{x}_{rn}^T(0)]$ ，速度条件为 $\mathbf{v}_{ri}(0) = [\mathbf{v}_{r1}^T(0), \mathbf{v}_{r2}^T(0), \dots, \mathbf{v}_{rn}^T(0)]$ ，加速度条件为 $\mathbf{a}_{ri}(0) = [\mathbf{a}_{r1}^T(0), \mathbf{a}_{r2}^T(0), \dots, \mathbf{a}_{rn}^T(0)]$ 。

综上，机器人运动学模型等价于

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\mathbf{x}}}_{ri}(t) \\ \dot{\hat{\mathbf{v}}}_{ri}(t) \\ \dot{\hat{\boldsymbol{\mu}}}_{ri}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_n & \mathbf{I}_n & \mathbf{0}_n \\ \mathbf{0}_n & \mathbf{0}_n & \mathbf{I}_n \\ -\gamma_1 \mathbf{L} & -\gamma_2 \mathbf{L} & -\gamma_3 \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{ri}(t) \\ \hat{\mathbf{v}}_{ri}(t) \\ \hat{\boldsymbol{\mu}}_{ri}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_n \\ \mathbf{0}_n \\ F_{ri}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_n & \mathbf{0}_n & \mathbf{0}_n \\ \mathbf{0}_n & \mathbf{0}_n & \mathbf{0}_n \\ \gamma_1 \mathbf{L} & \gamma_2 \mathbf{L} & \gamma_3 \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}'_{ri} \\ \mathbf{v}'_{ri} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (30)$$

2.4 稳定性分析

考虑所提算法具有一般性，选取 n 个移动机器人组成编队系统。针对移动机器人协同编队动态避障控制算法，通过 Lyapunov 函数证明其稳定收敛性。

定理 1: 假设移动机器人的固定通信网络拓扑图中含有一棵有向生成树，即该系统中每一个移动机器人至少可以通过某一邻居机器人获取通信

信息。当 $t \rightarrow \infty$ 时，编队系统在式(22)作用下可以实现编队的动态避障、机间防撞、状态变量一致收敛的控制目标。

证明: 对于式(30)，首先考虑其齐次方程的稳定性，通过移动机器人系统的总能量构造 Lyapunov 函数，由势能及动能构成，其中势能中的引力势能是目标点作用在机器人上，所以分析计算时将其设为 0，且 $\hat{F}_{ri}(t) = -\nabla U((t))$ 。

定义如下:

$$\begin{aligned} V(\hat{\mathbf{x}}_{ri}(t), \hat{\mathbf{v}}_{ri}(t), \mathbf{a}_{ri}(t)) = & U(\hat{\mathbf{x}}_{ri}(t)) + \frac{1}{2} \mathbf{a}_{ri}^T(t) \mathbf{a}_{ri}(t) + \frac{1}{2} \gamma_2 \hat{\mathbf{v}}_{ri}^T(t) \cdot \mathbf{L} \hat{\mathbf{v}}_{ri}(t) + \\ & \frac{1}{2} \gamma_1 \hat{\mathbf{x}}_{ri}^T(t) \mathbf{L} \hat{\mathbf{x}}_{ri}(t) \end{aligned} \quad (31)$$

其中:

$$\begin{aligned} U(\hat{\mathbf{x}}_{ri}(t)) = & \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n U_{rij}(\hat{\mathbf{x}}_{ri}(t)) + \right. \\ & \left. U_{ric}(\hat{\mathbf{x}}_{ri}(t)) + \sum_{o=1}^d U_{rod}(\hat{\mathbf{x}}_{ri}(t)) \right) \end{aligned} \quad (32)$$

对 $V(\hat{\mathbf{x}}_{ri}(t), \hat{\mathbf{v}}_{ri}(t), \mathbf{a}_{ri}(t))$ 求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\mathbf{a}_{ri}(t)) = & \mathbf{a}_{ri}^T(t) [\dot{U}_{ri}(\hat{\mathbf{x}}_{ri}(t)) + \dot{\mathbf{a}}_{ri}(t) + \gamma_2 \mathbf{L} \dot{\hat{\mathbf{v}}}_{ri}(t) + \gamma_1 \mathbf{L} \dot{\hat{\mathbf{x}}}_{ri}(t)] = \\ & \mathbf{a}_{ri}^T(t) [-\hat{F}_{ri}(t) - \gamma_1 \mathbf{L} \hat{\mathbf{x}}_{ri}(t) - \gamma_2 \mathbf{L} \hat{\mathbf{v}}_{ri}(t) - \gamma_3 \mathbf{L} \mathbf{a}_{ri}(t) + \gamma_2 \mathbf{L} \hat{\mathbf{v}}_{ri}(t) + \gamma_1 \mathbf{L} \hat{\mathbf{x}}_{ri}(t)] = \\ & -\gamma_3 \mathbf{a}_{ri}^T(t) \mathbf{L} \mathbf{a}_{ri}(t) = \\ & -\gamma_3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} (\mathbf{a}_{ri}(t) (\mathbf{a}_{ri}(t) - \mathbf{a}_{rj}(t))) = \\ & -\gamma_3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} [\|\mathbf{a}_{ri}(t) - \frac{1}{2} \mathbf{a}_{ri}(t)\|^2 + \|\frac{1}{2} \mathbf{a}_{rj}(t)\|^2] \leq 0 \end{aligned} \quad (33)$$

已知 γ_1 、 γ_2 、 γ_3 均大于 0，当 $t \rightarrow \infty$ 时， $V(\hat{\mathbf{x}}_{ri}(t), \hat{\mathbf{v}}_{ri}(t), \mathbf{a}_{ri}(t))$ 单调减小，定义集合如式(34)所示且为有界集。若初始状态 $[\hat{\mathbf{x}}_{ri}(t), \hat{\mathbf{v}}_{ri}(t), \mathbf{a}_{ri}(t)]^T \in L_V(c)$ 则： $V(\hat{\mathbf{x}}_{ri}(t), \hat{\mathbf{v}}_{ri}(t), \mathbf{a}_{ri}(t)) \leq c$ 对于 $\forall t$ 均成立，且 $L_V(c)$ 为不变集，对于 $\forall (\hat{\mathbf{x}}_{ri}(t), \hat{\mathbf{v}}_{ri}(t), \mathbf{a}_{ri}(t))^T \in L_V(c)$ ， $\dot{V}(\hat{\mathbf{x}}_{ri}(t))$ 为半负定。由 Lasalle 不变集原理，若 $t \rightarrow \infty$ 时，移动机器人系统将收敛至 $L_V(c)$ 的最大不变集中。即有： $\Omega = \{\mathbf{a}_{ri}(t) | \dot{V}(\mathbf{a}_{ri}(t)) = 0\}$ ，所以求解 $\dot{V}(\hat{\mathbf{a}}_{ri}(t)) = 0$

有 $\mathbf{a}_{r1}(t) = \mathbf{a}_{r2}(t) = \dots = \mathbf{a}_{rn}(t) = 0$, 此时 $\hat{\mathbf{x}}_{r1}(t) = \hat{\mathbf{x}}_{r2}(t) = \dots = \hat{\mathbf{x}}_{rn}(t) = 0$, 易知该系统拉普拉斯矩阵为半正定的, 易得 $V(\hat{\mathbf{x}}_{ri}(t), \hat{\mathbf{v}}_{ri}(t), \mathbf{a}_{ri}(t))$ 为半正定的, 易证移动机器人系统可达到稳定。

$$\mathbf{L}_V(c) = \{[\hat{\mathbf{x}}_{ri}(t), \hat{\mathbf{v}}_{ri}(t), \mathbf{a}_{ri}(t)]^T V(\hat{\mathbf{x}}_{ri}(t), \hat{\mathbf{v}}_{ri}(t), \mathbf{a}_{ri}(t)) \leq c\} \quad (34)$$

对于式(30)的特解, 加速度 \mathbf{a}_{ri} 均为固定常数, 所以移动机器人编队约束条件为 $\dot{\mathbf{v}}_{ri}' = 0, \dot{\mathbf{a}}_{ri} = 0$, 在该约束条件下将 $\mathbf{x}'_{ri}, \mathbf{v}'_{ri}, \mathbf{a}_{ri}$ 代入式(30)得到特解:

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{ri}(t) \\ \hat{\mathbf{v}}_{ri}(t) \\ \mathbf{a}_{ri}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}'_{ri} \\ \mathbf{v}'_{ri} \\ \mathbf{a}_{ri} \end{bmatrix} \quad (35)$$

则当 $t \rightarrow \infty$ 时, 式(35)的解渐近收敛为 $[\mathbf{x}'_{ri}, \mathbf{v}'_{ri}, \mathbf{a}_{ri}]^T$ 。

综上, 将协议增益系数设置为 $\gamma_1 > 0, \gamma_2 > 0, \gamma_3 > 0$, 多移动机器人系统在协议式(22)作用下可实现编队稳定, 且状态收敛一致。

3 仿真对比

3.1 参数初始化

仿真环境中的静态障碍物由正方体、锥体、球体、数学函数模型表示, 并分别表示水下环境中的暗礁、植物、水下探测器等静态障碍物, 动态障碍物的速度设置为 $v_0 = 5 \text{ m/s}$, 以此模拟水下复杂环境如图3所示。

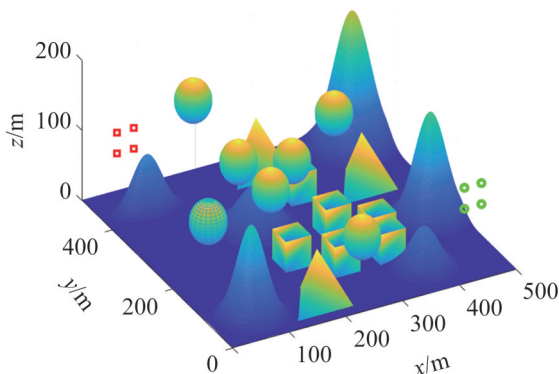


图3 仿真环境
Fig. 3 Simulation environment

AUV 与目标点位置坐标如表 1 所示, 4 个 AUV 在 X, Y, Z 3 个方向的初始期望速度矢量都为 $(3.54, -3.54, 0)$ 。其中, 数学函数模型坐标为其顶点坐标, 其他障碍物坐标为底面中心位置坐标, 具体位置坐标如表 2 所示。动态障碍物球体的起始位置坐标为 $(50, 175, 120)$, 终点位置坐标为 $(140, 460, 120)$ 。本文提出的协同编队动态避障控制算法中几个重要的参数如表 3 所示。

表 1 AUV 与目标点位置坐标
Table 1 Position coordinates of AUV and target point

名称	编号	坐标
AUV 的起始位置	1	(35, 450, 110)
	2	(65, 450, 80)
	3	(35, 45, 80)
	4	(65, 450, 80)
AUV 的目标点位置	1	(435, 50, 110)
	2	(465, 50, 110)
	3	(435, 50, 80)
	4	(465, 50, 80)

表 2 障碍物位置坐标
Table 2 Obstacle position coordinates

障碍物	编号	坐标
正方体	1	(300, 235, 0)
	2	(350, 180, 0)
	3	(340, 130, 0)
	4	(260, 130, 0)
	5	(200, 180, 0)
	6	(300, 350, 0)
锥体	1	(175, 50, 0)
	2	(400, 325, 0)
	3	(275, 440, 0)
球体	1	(190, 231, 110)
	2	(175, 310, 120)
	3	(260, 292, 110)
	4	(175, 460, 120)
	5	(260, 60, 75)
	6	(370, 360, 100)
数学函数模型	1	(450, 450, 190)
	2	(200, 300, 60)
	3	(75, 425, 80)
	4	(375, 70, 60)
	5	(455, 200, 150)
	6	(70, 70, 130)

表 3 参数数据表
Table 3 Parameter data table

参数	数值
α_{r1}	1.0
α_{r2}	3.0
δ	0.1
ζ	350
λ_1	0.15
λ_2	15
λ_3	0.1
m	0.5

3.2 结果分析

假设编队系统通信拓扑结构为固定无向图，且机间通信良好，拓扑图中包含一棵有向生成树保证机间通信。对 4 个移动机器人进行编队避障控制，其中 4 个移动机器人的通信拓扑网络如图 4 所示。

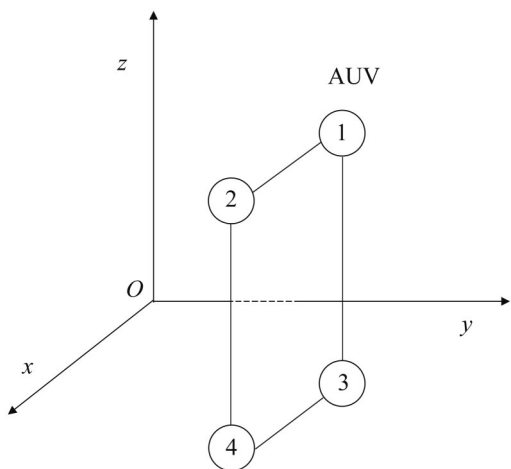


图 4 AUV 编队通信网络拓扑
Fig. 4 AUV formation communication network topology

根据图 4 所示的机器人编队通信拓扑图得其拉普拉斯矩阵为

$$L = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (36)$$

为方便描述，将编队拓扑投影至 XOZ 平面，图 5~6 分别为在惯性坐标系下，机器人编队未稳定与趋于稳定的情况。

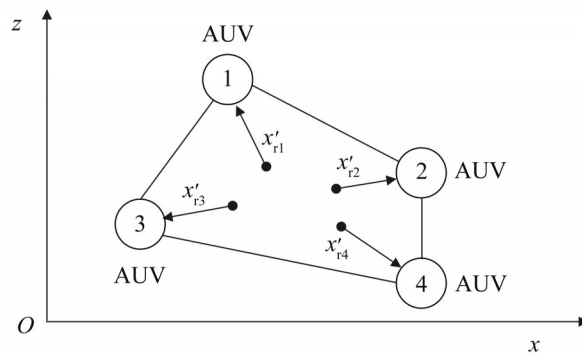


图 5 队形不稳定示意图
Fig. 5 Schematic diagram of unstable formation

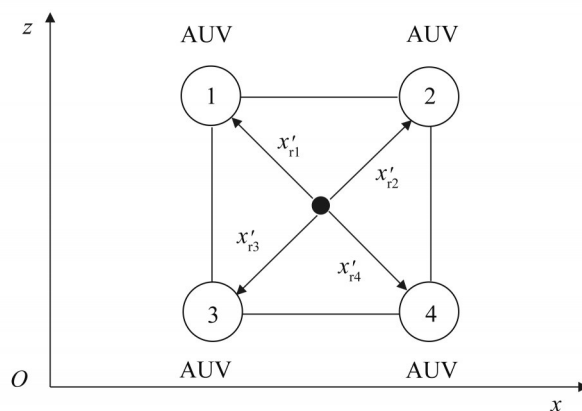


图 6 队形稳定示意图
Fig. 6 Schematic diagram of formation stability

若机器人编队不稳定，则编队中心位置不同，如图 5 所示；若机器人编队稳定，则各个机器人相应的编队中心位置应相同，此时可得相邻机器人的位置趋于一致，如图 6 所示。

仿真分析是模拟 4 个移动机器人在水下环境中的编队避障。在传统势场法、自适应扩展势场法，以及协同编队动态避障控制算法下，对移动机器人的编队路径、速度分量、相对位置关系 3 个方面进行比较。

4 个移动机器人在不同算法下的编队路径对比如图 7 所示。

由图 7(a)可以看出，在传统人工势场法下，移动机器人无法在存有动态障碍物的 3D 水下环境中实现对动态障碍物的规避，也无法规划出完整的路

径。由图7(b)可以看出,在自适应扩展势场函数下,虽然规划出完整路径但并未对动态障碍物进行有效规避。由图7(c)可以看出,在本文提出的协同编队动态避障控制算法下,移动机器人既能有效规避动态障碍物,又能按编队要求安全到达目的点。

4个移动机器人在自适应扩展势场法以及本文提出的协同编队动态避障控制算法下的速度变化曲线对比如图8所示。

图8中 x 、 y 及 z 轴的初始速度分量分别为

3.54 m/s、-3.54 m/s和0。其中自适应扩展势场法下的机器人3个方向的速度均在规避障碍物时出现了一定程度的波动,其中 x 轴及 y 轴方向的速度都能在70 s左右收敛到初始给定速度, z 轴速度分量中的机器人1和2收敛到一致,但未达到初始速度。而且通过图8可以看出,与协同编队动态避障控制算法相比,自适应扩展算法下的移动机器人在0~20 s内速度并没有出现波动,即反映出机器人没有对动态障碍物进行规避。

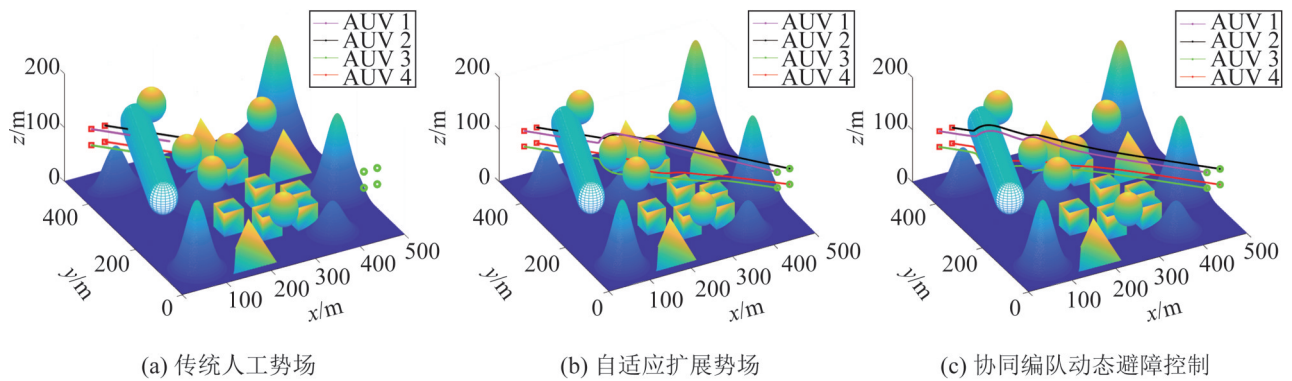


图7 不同算法下的编队路径图

Fig. 7 Schematic diagram of formation paths under different algorithms

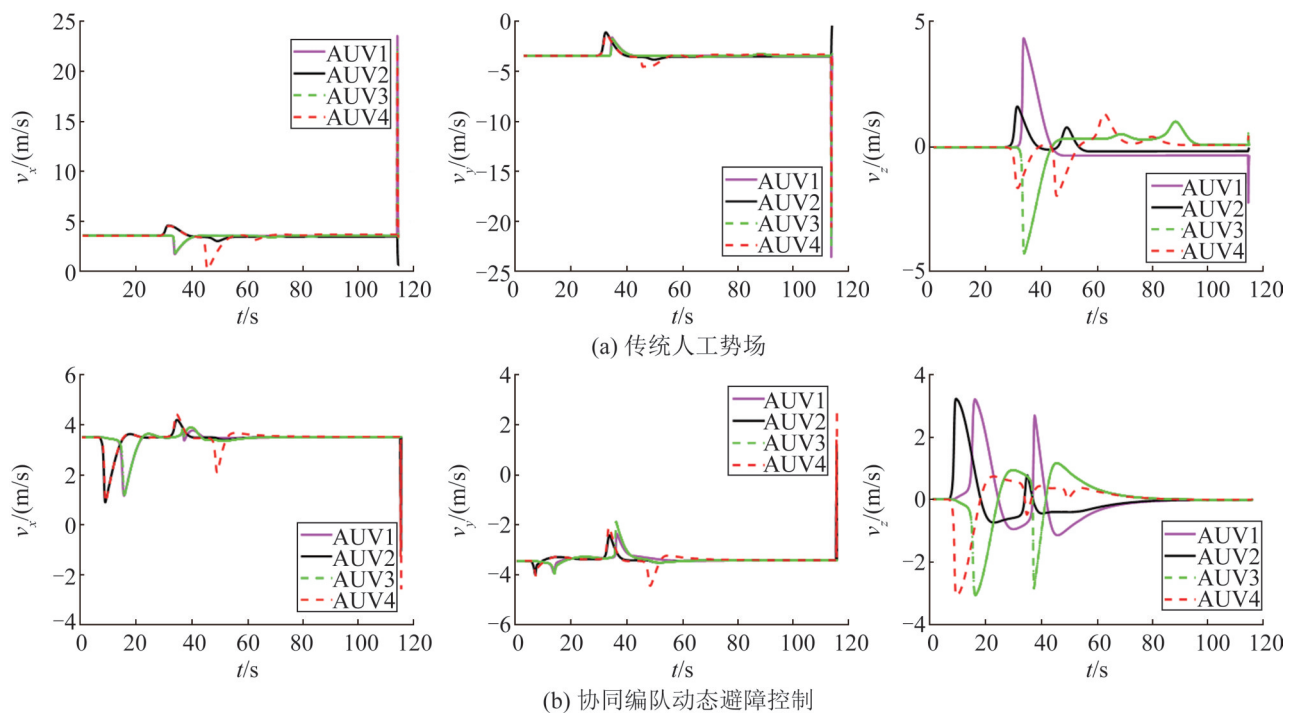


图8 不同算法下的速度变化曲线

Fig. 8 Speed curve under different algorithms

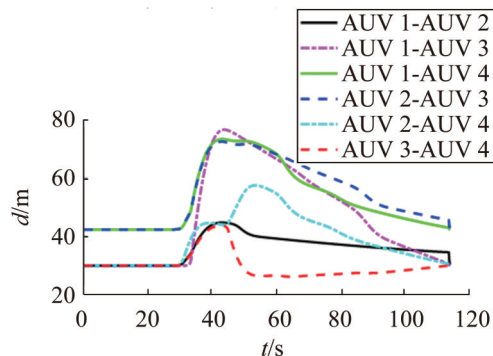
协同编队动态避障控制算法下的机器人在 3 个方向的速度分量均在规避障碍物时出现 2 次波动，分别为对动态、静态障碍物的规避，但 x 轴及 y 轴的速度分量波动后均能在一定时间内收敛到初始速度， z 轴速度分量也能在一定时间内恢复至初始给定速度。

4 个移动机器人在自适应扩展势场法以及本文提出的协同编队动态避障控制算法下的位置变化曲线对比如图 9 所示。

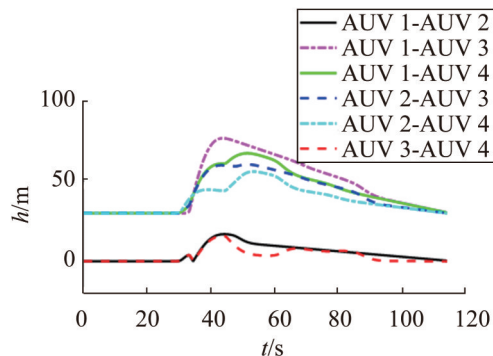
相对距离中 AUV1 与 AUV4、AUV2 与 AUV3 的机间距离为 42.43 m，其他机间距离为 30 m。关于相对高度，其中由通信网络拓扑图可知，AUV3 与 AUV4、AUV1 与 AUV2 在同一高度，既相对高度为 0，其他机间高度距离差为 30 m。由图 9 得出，自适应扩展势场法下，其相对距离在避障过程中出现较大波动，避障完成后并未随时间变化收敛至初始相对距离，没有达到最佳编队距离；相对高度在波动后也未收敛至初始相对高度。

协同编队动态避障控制算法中的相对距离与相对高度均在避障过程中出现较大波动，但随着行进过程其相对距离在 80 s 基本收敛到一致并达到预期编队距离，其相对高度在 70 s 左右时也收敛一致并达到预期编队高度，即规避障碍物后的一段时间后可以按照期望编队队形行进。

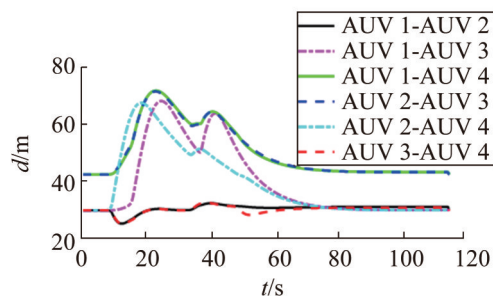
根据以上的实验仿真结果可以看出，采用传统的人工势场法时多移动机器人无法对动态障碍物进行有效的规避进而无法到达目标点。采用自适应扩展势场法的路径规划方法时，多移动机器人虽可以到达预设目标点，但移动过程中并未对移动障碍物进行规避，而在协同编队动态避障控制算法下的仿真结果表明，多移动机器人能对环境中存在的静态、动态障碍物有效规避，并能够在避障避碰的前提下以较快的速度收敛至期望的编队队形，实现位置以及速度的一致收敛，从而达到预期设计目标。



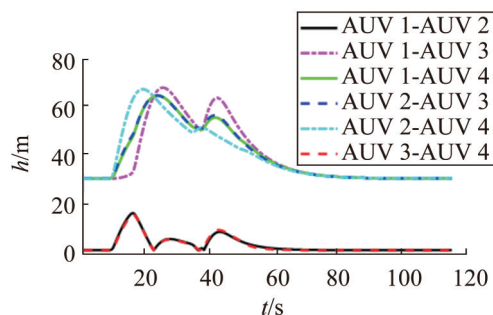
(a) 自适应扩展势场相对距离变化曲线



(b) 自适应扩展势场相对高度变化曲线



(c) 协同编队动态避障控制相对距离变化曲线



(d) 协同编队动态避障控制相对高度变化曲线

图 9 不同算法下的位置变化曲线

Fig. 9 Position change curve under different algorithms

4 结论

本文主要针对AUV对动态障碍物规避以及机间碰撞的问题在文献[18]基础上对势场进行改进,即建立动态障碍物的斥力势场和机间相互作用势场,使改进后的水下机器人对静态、动态障碍物都能很好地规避,避免机间碰撞以及脱离编队情况,以此结合改进势场法与一致性理论建立多移动机器人的协同编队动态避障控制算法。在建立的三维复杂水下环境模型中进行仿真,验证了本文所提算法的有效可行性。

在未来的工作中,会继续考虑到水下环境更复杂,障碍物情况更多变,以及多移动机器人之间通信受阻中断的情况,继而找到相应的解决方法。

参考文献:

- [1] Cui R, Ge S S, Voon Ee How B, et al. Leader-Follower Formation Control of Underactuated Autonomous Underwater Vehicles[J]. *Ocean Engineering*(S0029-8018), 2010, 37(17/18): 1491-1502.
- [2] Ma Lifeng, Wang Zidong, Han Qinglong, et al. Consensus Control of Stochastic Multi-Agent Systems: a Survey[J]. *Science China (Information Sciences)* (S1674-733X), 2017, 60(12): 5-19.
- [3] Hu Jinglin, Sun Xiuxia, He Lei. Time-Varying Formation Tracking for Multiple UAVs with Nonholonomic Constraints and Input Quantization Via Adaptive Backstepping Control [J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*(S2093-274X), 2019, 20(3): 710-721.
- [4] Wang Wei. A New Formation Control Strategy Based on the Virtual-Leader-Follower and Artificial Potential Field [C]//34rd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC). Jinzhou, China: IEEE, 2019: 485-492.
- [5] 李正平, 鲜斌. 基于虚拟结构法的分布式多无人机鲁棒编队控制[J]. *控制理论与应用*, 2020, 37(11): 2423-2431. Li Zhengping, Xian Bin. Robust Distributed Formation Control of Multiple Unmanned Aerial Vehicles Based on Virtual Structure [J]. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(11): 2423-2431.
- [6] Giroung Lee, Dongkyoung Chwa. Decentralized Behavior-Based Formation Control of Multiple Robots Considering Obstacle Avoidance[J]. *Intelligent Service Robotics*(S1861-2776), 2018, 11(1): 127-138.
- [7] 马小陆, 梅宏. 基于改进势场蚁群算法的移动机器人全局路径规划[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(1): 19-27. Ma Xiaolu, Mei Hong. Mobile Robot Global Path Planning Based on Improved Ant Colony System Algorithm with Potential Field [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(1): 19-27.
- [8] 李卫硕, 孙剑, 陈伟. 基于BP神经网络机器人实时避障算法[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(11): 204-211. Li Weishuo, Sun Jian, Chen Wei. Real-Time Obstacle Avoidance Algorithm for Robots Based on BP Neural Network [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(11): 204-211.
- [9] 祁若龙, 周维佳, 刘金国, 等. 基于概率论的机器人高斯运动避障轨迹规划方法[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(5): 93-100. Qi Ruolong, Zhou Weijia, Liu Jinguo, et al. Obstacle Avoidance Trajectory Planning for Gaussian Motion of Robot Based on Probability Theory [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(5): 93-100.
- [10] Zhang J, Yan J, Zhang P. Fixed-Wing UAV Formation Control Design with Collision Avoidance Based on an Improved Artificial Potential Field[J]. *IEEE Access* (S2169-3536), 2018, 6: 78342-78351.
- [11] Wang Hongbo, Chen Li, Zhang Weihua. Lane-Keeping Control Based on an Improved Artificial Potential Method and Coordination of Steering/Braking Systems [J]. *IET Intelligent Transport Systems* (S1751-956X), 2019, 13(12): 1832-1842.
- [12] 张强, 陈兵奎, 刘小雍, 等. 基于改进势场蚁群算法的移动机器人最优路径规划[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(5): 23-32, 42. Zhang Qiang, Chen Bingkui, Liu Xiaoyong, et al. Ant Colony Optimization with Improved Potential Field Heuristic for Robot Path Planning [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2019, 50(5): 23-32, 42.
- [13] 代冀阳, 王村松, 殷林飞, 等. 飞行器分层势场路径规划算法[J]. *控制理论与应用*, 2015, 32(11): 1505-1510. Dai Jiyang, Wang Cunsong, Yin Linfei, et al. Hierarchical Potential Field Algorithm of Path Planning for Aircraft[J]. *Control Theory and Applications*, 2015, 32(11): 1505-1510.
- [14] Cao Yanfen, Sun Yuangong. Necessary and Sufficient Conditions for Consensus of Third-Order Discrete-Time Multi-Agent Systems in Directed Networks[J]. *Journal of Applied Mathematics and Computing*(S1598-5865), 2018, 57(1/2): 199-210.

- [15] Wang J, Leone R D, Fu S, et al. Event-Triggered Control Design for Networked Evolutionary Games with Time Invariant Delay in Strategies[J]. International Journal of Systems Science(S0020-7721), 2021, 52(3): 493-504.
- [16] Marius E Yamakou. Chaotic Synchronization of Memristive Neurons: Lyapunov Function Versus Hamilton Function[J]. Nonlinear Dynamics(S0924-090X), 2020, 101: 487-500.
- [17] Khatib O. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots[J]. International Journal of Robotics Research(S0278-3649), 1986, 5(1): 90-98.
- [18] 王宁, 代冀阳, 应进, 等. 基于自适应扩展势场的多无人机航迹规划仿真[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(9): 2147-2156.
- Wang Ning, Dai Jiyang, Ying Jin, et al. Multi-UAV Trajectory Planning Simulation Based on Adaptive Extended Potential Field [J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(9): 2147-2156.