

文章编号:1006-2467(2020)03-0295-10

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2020.03.009

基于零空间行为法的自主水下机器人避障策略

庞师坤, 梁晓锋, 李英辉, 易宏

(上海交通大学 海洋智能装备与系统教育部重点实验室; 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 针对自主水下机器人(AUV)在复杂海底环境驶向目标点的过程中可能遇到动静态障碍物的问题,设计了基于零空间行为(NSB)法的避障策略. 首先将 AUV 驶向目标点的整体任务分解成不同的子任务,并把避障子任务设为最高优先级任务;对于多任务控制目标,将由低优先级任务向量向高优先级任务向量的零空间进行投影得到的综合任务向量作为最终输出函数;在完成高优先级任务的同时,部分或全部完成低优先级任务,以避免各任务目标的相互冲突. 随后根据不同子任务的优先级设计相应的任务函数,研究了针对静态和动态障碍物的避障策略;推导并建立了 AUV 运动的综合输出函数,以确保其在驶向目标点的过程中对不同类型障碍物进行有效规避. 模拟计算结果证明该方法是有效的和可行的,在复杂障碍物环境中能够达到预期的避障效果.

关键词: 零空间行为法; 自主水下机器人; 避障

中图分类号: U 675.93

文献标志码: A

Collision Avoidance Strategy for Autonomous Underwater Vehicle Based on Null-Space-Based Behavioral Approach

PANG Shikun, LIANG Xiaofeng, LI Yinghui, YI Hong

(Key Laboratory of Marine Intelligent Equipment and System of Ministry of Education;
State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai 200240, China)

Abstract: An autonomous underwater vehicle (AUV) obstacle avoidance strategy based on null-space-based behavioral (NSB) approach is designed, aiming at solving dynamic or static obstacle avoidance problem the AUV will encounter while moving to the target in complex underwater environment. Firstly, the AUV overall task moving to the target is decomposed into different subtasks, and the obstacle avoidance subtask is set as the highest priority. As for multi-task control targets, the low-level task vector is projected to the null space of the higher task vector, and the integrated task output is used as the final output function. The low-level task is partially or completely completed while completing the higher task, thereby the mutual conflict between different level targets can be avoided in this way. In order to study the obstacle avoidance strategy for static and dynamic obstacles, the corresponding task functions are designed in accordance with different subtask priorities. The comprehensive output function of AUV motion is deduced and established to ensure that it can avoid different types of obstacles effectively in the process of heading to the target point. The simulation results demonstrate the effectiveness and the feasibility of the proposed method, which could achieve an expected obstacle avoidance effect in complex underwater obstacle environments.

收稿日期:2018-10-18

作者简介:庞师坤(1987-),男,安徽省宿州市人,博士生,主要从事水下机器人控制研究.

通信作者:梁晓锋,男,副研究员,电话(Tel.):021-34207165;E-mail: liang_xiaofeng@sjtu.edu.cn.

Key words: null-space-based behavioral (NSB) approach; autonomous underwater vehicle (AUV); obstacle avoidance

自主水下机器人(AUV)是具有智能行为的高级水下机器人,具有活动范围广、机动灵活、隐蔽性好等特点,能够适用于复杂的海底环境.为了在不可预知的海底环境中安全完成既定任务,AUV要能够利用自身携带的传感探测设备(声呐、摄像头等)并结合相应的算法进行实时避障.人工势场法^[1-4]、动态窗口法^[5-7]、A*及其改进算法^[8-13]、基于行为法^[14-18]等,是目前应用较多的避障方法.

基于行为法广泛应用于诸如移动机器人、无人艇、无人机等的无障碍路径规划领域.无障碍路径规划采用自底向上的系统构建方法,基于行为法将任务目标分解为一系列相互作用的基本子行为,如感知、探测、避障、规划,构成并行控制回路,通过协调配合后作用于执行机构,产生相应的目标任务动作.单个子行为仅需要完成某项简单任务,能够对环境产生快速响应,并且可以灵活地扩展整个系统的能力^[19].行为选择机制主要有行为抑制法、加权平均法和模糊逻辑法^[20].其中模糊逻辑法可以实时地调整任务权值,从而优化任务完成的质量,因此在实际应用领域很受欢迎.文献[21]提出的零空间行为(NSB)法即为模糊逻辑法的一种.与其他基于行为的方法相比,NSB法在保持首要任务完全完成的前提下,可以充分利用零空间完成其他次要任务,具有实时性强、各子任务间零冲突的优点.

本文采用NSB法,针对AUV在复杂海底环境中对静态和动态障碍物的规避进行研究.在按需对整体任务进行分解的基础上,建立不同优先级的子任务函数,并对不同障碍物的避障策略进行分析.

1 NSB 法

NSB法首先将整体任务,即驶向目标点,分解成多个各自独立控制目标的子任务,并分别列出各子任务函数,每个子任务函数都能完成对应的控制目标;然后将子任务分成不同的优先级,将由低优先级的任务向量向高优先级任务向量的零空间投影得到任务的整体综合输出函数传递给底层的执行机构以控制AUV的动作.设: $\boldsymbol{\eta}=[x \ y \ \phi]^T$ 为AUV惯性坐标系下的位置和艏向角; $\mathbf{v}=[u \ v \ r]^T$ 为AUV随体坐标系下的速度和转艏角速度(u 为纵向速度, v 为横向速度, r 为转艏角速度); $\boldsymbol{\sigma}$ 为控制目标的任务变量,其函数模型为

$$\boldsymbol{\sigma} = f(\boldsymbol{\eta}) \quad (1)$$

将 $\boldsymbol{\sigma}$ 对 $\boldsymbol{\eta}$ 求导可得

$$\boldsymbol{\sigma}' = \frac{\partial f(\boldsymbol{\eta})}{\partial \boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{v} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})$ 为 $\boldsymbol{\eta}$ 的输出雅可比矩阵.

速度矩阵的最小二乘解为

$$\mathbf{v}_d = \mathbf{J}^\dagger(\boldsymbol{\sigma}'_d + \boldsymbol{\lambda} \tilde{\boldsymbol{\sigma}}) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{J}^\dagger = \mathbf{J}^T(\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1}$; $\boldsymbol{\sigma}'_d$ 为任务期望值; $\tilde{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{\sigma}_d - \boldsymbol{\sigma}$; $\boldsymbol{\lambda} > \mathbf{0}$ 为增益矩阵.式(3)表示单个任务的速度输出.

用 i 表示任务的优先级($i=1$ 时,任务优先级最高),第 i 个任务的速度输出可表示为

$$\mathbf{v}_{i,d} = \mathbf{J}_i^\dagger(\boldsymbol{\sigma}'_{i,d} + \boldsymbol{\lambda} \tilde{\boldsymbol{\sigma}}_i) \quad (4)$$

第 i 个任务的向较高一级任务零空间的投影为可表示为

$$\mathbf{N}_i(\mathbf{J}) = \mathbf{I} - \mathbf{J}_i^\dagger \mathbf{J}_i \quad (5)$$

式中: \mathbf{I} 为单位矩阵.

由低等级的任务向较高级的任务空间投影,可得出整体控制目标的速度输出为

$$\mathbf{v}_d = \mathbf{v}_1 + \sum_{i=2}^n \mathbf{N}_i(\mathbf{J}) \mathbf{v}_i \quad (6)$$

当有3个不同等级任务时,综合任务的速度输出可表示为

$$\mathbf{v}_d = \mathbf{v}_1 + \mathbf{N}_1(\mathbf{v}_2 + \mathbf{N}_2 \mathbf{v}_3) \quad (7)$$

以两个任务为例,其综合输出速度的几何模型如图1所示. \mathbf{v}_2 首先向 \mathbf{v}_1 的零空间投影,进而得到 $\mathbf{v}_d = \mathbf{v}_1 + \mathbf{N}_1 \mathbf{v}_2$, \mathbf{v}_d 为任务速度 \mathbf{v}_1 和任务速度 \mathbf{v}_2 的NSB输出.

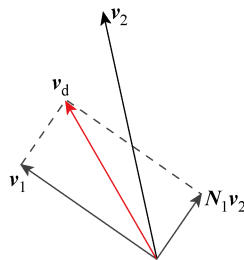


图1 两任务时综合输出速度的几何模型

Fig. 1 Geometrical model of \mathbf{v}_d for a two-task example

2 避障策略

本文主要针对AUV对平面内不同类型障碍物的避障策略进行分析讨论.为便于分析模拟,根据实际情况和AUV绕过障碍物的方向,假设:

- (1) 障碍物无法与 AUV 进行通信且不会对 AUV 进行主动规避.
- (2) AUV 可以探测到相对于动静态障碍物的运动速度和方位角,选择逆时针或者顺时针方向绕过障碍.
- (3) AUV 可以探测到当前时刻动态障碍物的速度,但是无法预知其下一时刻速度,因此假设动态障碍物的运动速度是固定的.
- 根据假设(1),当 AUV 利用自身携带的传感器(声呐、摄像头等)探测到障碍物时,需根据障碍物类型进行主动规避.单个静态障碍物类型相对简单,文中不再赘述.针对动态障碍物,可分为正面障碍物

(见图 2)和侧面障碍物(见图 3)两大类.对于正面障碍物,AUV 可以选择顺时针或逆时针方向进行规避(本文设为逆时针规避);对于侧面障碍物,AUV 需要判断自身与障碍物的相对运动方向和方位,选择合理的转艏方向,从而顺利规避障碍物.

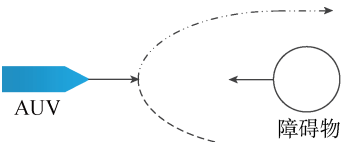


图 2 正面障碍物
Fig. 2 Head-on obstacle

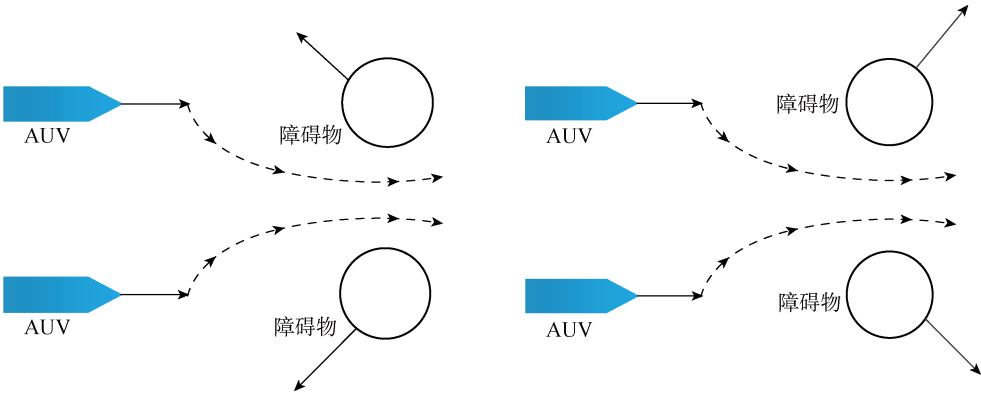


图 3 侧面障碍物
Fig. 3 Lateral obstacle

根据假设(2),首先将障碍物的速度转换到 AUV 随体坐标系上:

$$\mathbf{v}_o^b = \mathbf{R}(\theta) \mathbf{v}_o^n \tag{8}$$

式中:上标 b 和 n 分别表示随体坐标系和惯性坐标系; $\mathbf{R}(\theta)$ 为转换矩阵; θ 为转换角.

AUV 在随体坐标系下相对障碍物运动方向为

$$\beta = \arctan 2(v_{o,y}^b, v_{o,x}^b) \tag{9}$$

式中: $v_{o,x}^b$ 和 $v_{o,y}^b$ 分别表示 AUV 在随体坐标系下相对于障碍物在 x 和 y 方向上的分速度.

由于 β (见图 4,图中 \mathbf{v}_o 和 \mathbf{v}_v 分别为障碍物和 AUV 的速度)的取值范围为 $-180^\circ < \beta < 180^\circ$,而常规的四象限定义 $0^\circ < \beta < 360^\circ$,所以当 $\beta < 0^\circ$ 时, β 需在原来的基础上加 360° ,从而满足要求. AUV 根据 β 所在的象限,选择绕过障碍物的方向,当 β 在第 I 和第 II 象限时,选择顺时针方向,当 β 在第 III 和第 IV 象限时,选择逆时针方向.在此情形下,AUV 从障碍物后面绕过且两者方向没有交叉,因此路径是安全的.

文中设定当 AUV 运动方向相对于障碍物的运动方向角度的绝对值小于 20° 时为正面障碍物,此

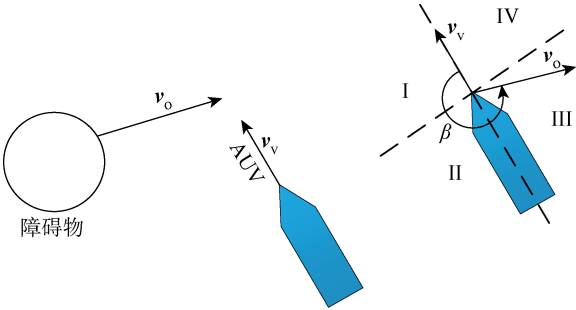


图 4 β 角象限示意图
Fig. 4 Quadrant diagram of angle β

时 $|\beta - 180^\circ| \leq 20^\circ$.

2.1 障碍物探测

AUV 和障碍物的路径 $\mathbf{V}(t)$ 和 $\mathbf{O}(t)$ 分别表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{V}(t) &= \begin{bmatrix} x_v(t) \\ y_v(t) \end{bmatrix} = \\ &\begin{bmatrix} | \mathbf{v}_v | t \cos \theta_{vt} + p_{v,x} \\ | \mathbf{v}_v | t \sin \theta_{vt} + p_{v,y} \end{bmatrix} \\ \mathbf{O}(t) &= \begin{bmatrix} x_o(t) \\ y_o(t) \end{bmatrix} = \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{bmatrix} | \mathbf{v}_o | t \cos \theta_o + p_{o,x} \\ | \mathbf{v}_o | t \sin \theta_o + p_{o,y} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: θ_{vt} 为 AUV 到目标点的方向角; θ_o 为移动障碍物的方向角; t 为时间变量; $p_{v,x}$ 、 $p_{v,y}$ 和 $p_{o,x}$ 、 $p_{o,y}$ 分别为当前时刻 AUV 和障碍物的位置, 两者之间的距离为

$$f(t) = \|\mathbf{V}(t) - \mathbf{O}(t)\|_2 \quad (12)$$

式中: $\|\cdot\|$ 为欧几里德范数。

首先当 AUV 探测到障碍物时, 启动避障算法。AUV 根据当前时刻自身和障碍物的速率以及相对方向角等信息, 计算下一时刻两者的相对位置。根据假设(3), 当 $f(t)$ 进入到障碍物的安全范围内时, AUV 开启避障子任务。根据迭代信息和 NSB 算法, AUV 判断是否已经安全绕过障碍物。如图 5 所示, 当 AUV 在位置 a 时, 探测到障碍物, 同时估算路径并启动避障算法, 此后则一直进行探测和位置的迭代更新; 在位置 b 时, AUV 根据实时更新的障碍物相对位置和方位角, 再次进行路径估算, 判断路径是否安全; 在位置 c 时, 确认路径安全, 避障算法停止, AUV 驶向设定目标点。

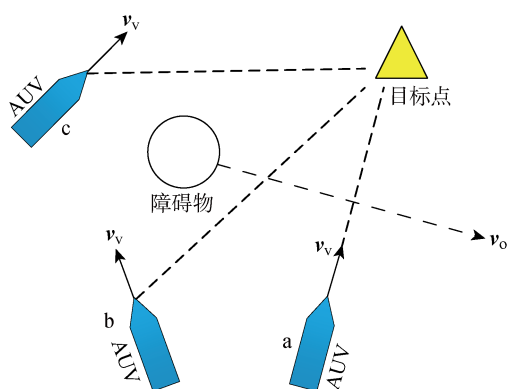


图 5 AUV 避障过程

Fig. 5 Process of AUV collision avoidance

2.2 任务分解

为了使基于 NSB 法的避障策略能够处理静态和动态障碍物, 并根据前文所述的避障策略选择绕过障碍物的方向, 按照不同优先级将避障任务分解为任务 1(避障)、任务 2(绕过障碍物)、任务 3(驶向目标点)3 个子任务, 同时根据 AUV 与障碍物之间的相对距离将障碍物周围分为安全区、常规避障区和紧急避障区 3 个区域(见图 6)。在安全区内, 认为障碍物对 AUV 无威胁, AUV 正常驶向目标点, 即为任务 3; 在常规避障区内, AUV 探测到障碍物, 启动任务 2, 关闭任务 1、3, 以便 AUV 选择绕过障碍物的方向和虚拟切点位置; 在紧急避障区内未绕过

障碍物前, AUV 启动任务 1、2, 关闭任务 3, 确保 AUV 以最佳路径顺利绕过障碍物; 确认绕过障碍物后, 在避障区内任务 1、3 同时启动, 关闭任务 2; 驶出避障区后, 关闭任务 1、2, 开启任务 3, AUV 重新规划路线, 选择最短路径驶向目标点。

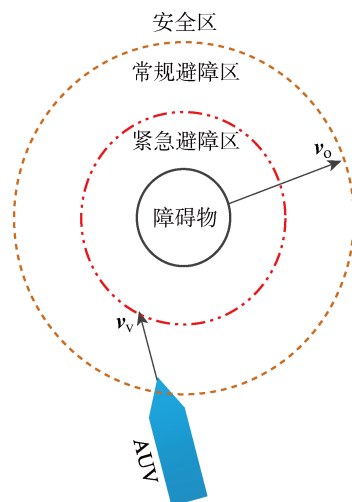


图 6 不同避障区

Fig. 6 Different zones of collision avoidance

任务 1 避障。在多控制目标任务中, 避障任务作为最高优先级, 任务变量 σ_1 表示 AUV 的位置 \mathbf{P}_v 到障碍物中心 \mathbf{P}_o 的距离:

$$\sigma_1 = \|\mathbf{P}_v - \mathbf{P}_o\|_1 \quad (13)$$

$\sigma_{1,d}$ 为障碍物的安全阈值(安全距离):

$$\sigma_{1,d} = d \quad (14)$$

对应的雅可比矩阵为

$$\mathbf{J}_1 = \frac{\mathbf{P}_v - \mathbf{P}_o}{\|\mathbf{P}_v - \mathbf{P}_o\|_1} = \hat{\mathbf{r}}^T \quad (15)$$

式中: $\hat{\mathbf{r}}^T$ 为由 AUV 指向障碍物的单位向量, 当且仅当 $\mathbf{P}_v \neq \mathbf{P}_o$ 时, $\hat{\mathbf{r}}^T$ 存在。

任务 1 的输出速度为

$$\mathbf{v}_1 = \mathbf{J}_1^T \boldsymbol{\lambda}_1 (d - \sigma_1) \quad (16)$$

式中: $\boldsymbol{\lambda}_1$ 为任务 1 的增益矩阵, 其零空间向量为

$$\mathbf{N}_1 = \mathbf{I} - \mathbf{J}_1^T \mathbf{J}_1 = \mathbf{I} - \hat{\mathbf{r}} \hat{\mathbf{r}}^T \quad (17)$$

任务 2 绕过障碍物。作为第 2 优先级的控制目标任务 2, 引导 AUV 按照顺时针或者逆时针方向绕过障碍物, 其任务变量为

$$\sigma_2 = \|\mathbf{P}_v\|_1 \quad (18)$$

$$\sigma_{2,d} = \|\mathbf{t}_o\|_1 \quad (19)$$

式中: \mathbf{t}_o 为障碍物上的虚拟切点。

首先定义起始点 \mathbf{P}_s 分别到障碍物中心点 \mathbf{P}_o 和切点 \mathbf{t}_1 (见图 7)的向量 \mathbf{P}_{so} 和 \mathbf{P}_{st_1} :

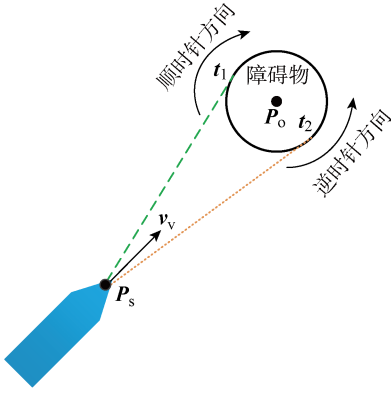


图7 虚拟切点示意图

Fig. 7 Schematic diagram of virtual point of tangency

$$\mathbf{P}_{so} = \mathbf{P}_o - \mathbf{P}_s \quad (20)$$

$$\mathbf{P}_{st_1} = \mathbf{t}_1 - \mathbf{P}_s \quad (21)$$

其长度分别为

$$d_{so} = \|\mathbf{P}_o - \mathbf{P}_s\|_2 \quad (22)$$

$$d_{st_1} = \sqrt{d_{so}^2 - r_o^2} \quad (23)$$

式中: r_o 为障碍物半径.

然后确定 \mathbf{P}_{st_1} 与 xOy 平面的夹角 θ_{t_1} :

$$\theta_{t_1} = \theta_{t_1,1} + \theta_{t_1,2} \quad (24)$$

$$\theta_{t_1,1} = \arcsin \frac{r_o}{d_{so}} \quad (25)$$

$$\theta_{t_1,2} = \arctan 2(P_{so,y}, P_{so,x}) \quad (26)$$

式中: $\theta_{t_1,1}$ 为 \mathbf{P}_{so} 和 \mathbf{P}_{st_1} 之间的夹角; $\theta_{t_1,2}$ 为 \mathbf{P}_{so} 与 xOy 平面的夹角.

设二维转换矩阵 $\mathbf{R}(\theta)$ 为

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (27)$$

则切点 \mathbf{t}_1 为

$$\mathbf{t}_1 = \mathbf{R}(\theta_{t_1}) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} d_t + \mathbf{P}_s \quad (28)$$

式中: d_t 为当前时刻AUV距离障碍物的距离.

同理,当AUV逆时针绕过障碍物时,

$$\theta_{t_2} = \theta_{t_2,2} - \theta_{t_2,1} \quad (29)$$

切点 \mathbf{t}_2 为

$$\mathbf{t}_2 = \mathbf{R}(\theta_{t_2}) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} d_t + \mathbf{P}_s \quad (30)$$

任务2的变量为一条直线,其雅可比矩阵为

$$\mathbf{J}_2 = \mathbf{I} \quad (31)$$

输出速度为

$$\mathbf{v}_2 = \lambda_2(\mathbf{t}_o - \mathbf{P}_v) \quad (32)$$

式中: λ_2 为任务2的增益矩阵.

那么零空间 $\mathbf{N}_2 = \mathbf{0}$,任何低级任务的输出速度

投影到该任务空间,投影都为 $\mathbf{0}$.考虑到任务2和任务3不可能同时激活,因此该零空间亦不会使用.

任务3 驶向目标点.在本文中最低优先级为驶向目标点的控制目标任务3,在AUV避障任务完成前后,确保AUV沿最短路径到达目标点.考虑到AUV沿直线到达目标,其任务变量为

$$\sigma_3 = \|\mathbf{P}_v\|_1 \quad (33)$$

$$\sigma_{3,d} = \|\mathbf{P}_t\|_1 \quad (34)$$

同任务2类比,其雅可比矩阵、输出速度和零空间分别为

$$\mathbf{J}_3 = \mathbf{I} \quad (35)$$

$$\mathbf{v}_3 = \lambda_3(\mathbf{P}_t - \mathbf{P}_v) \quad (36)$$

$$\mathbf{N}_3 = \mathbf{0} \quad (37)$$

式中: \mathbf{P}_t 为目标点位置; λ_3 为任务3的增益矩阵.

根据式(6),AUV的综合任务速度输出为

$$\mathbf{v}_d = \mathbf{v}_1 + \mathbf{N}_1 \mathbf{v}_2 + \mathbf{N}_1 \mathbf{N}_2 \mathbf{v}_3 \quad (38)$$

为了保证避障任务的顺利完成,本文设计了适用于NSB法的任务管理器(见图8和9).任务管理器根据AUV探测到的障碍物和避障算法,决定何时激活和抑制对应的任务.特别需要注意的是,当任务1未激活时,任务2、3无需向该任务零空间进行投影.

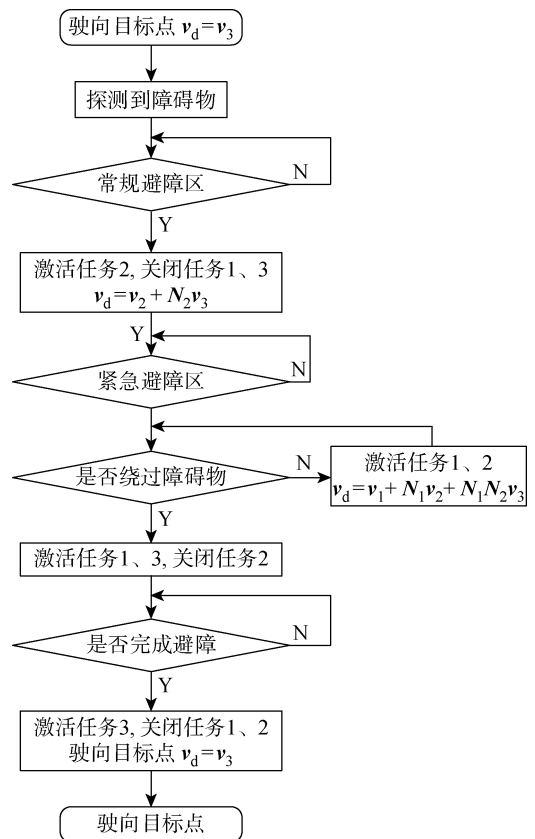


图8 NSB任务管理器控制逻辑图

Fig. 8 Control logic diagram of NSB task manager

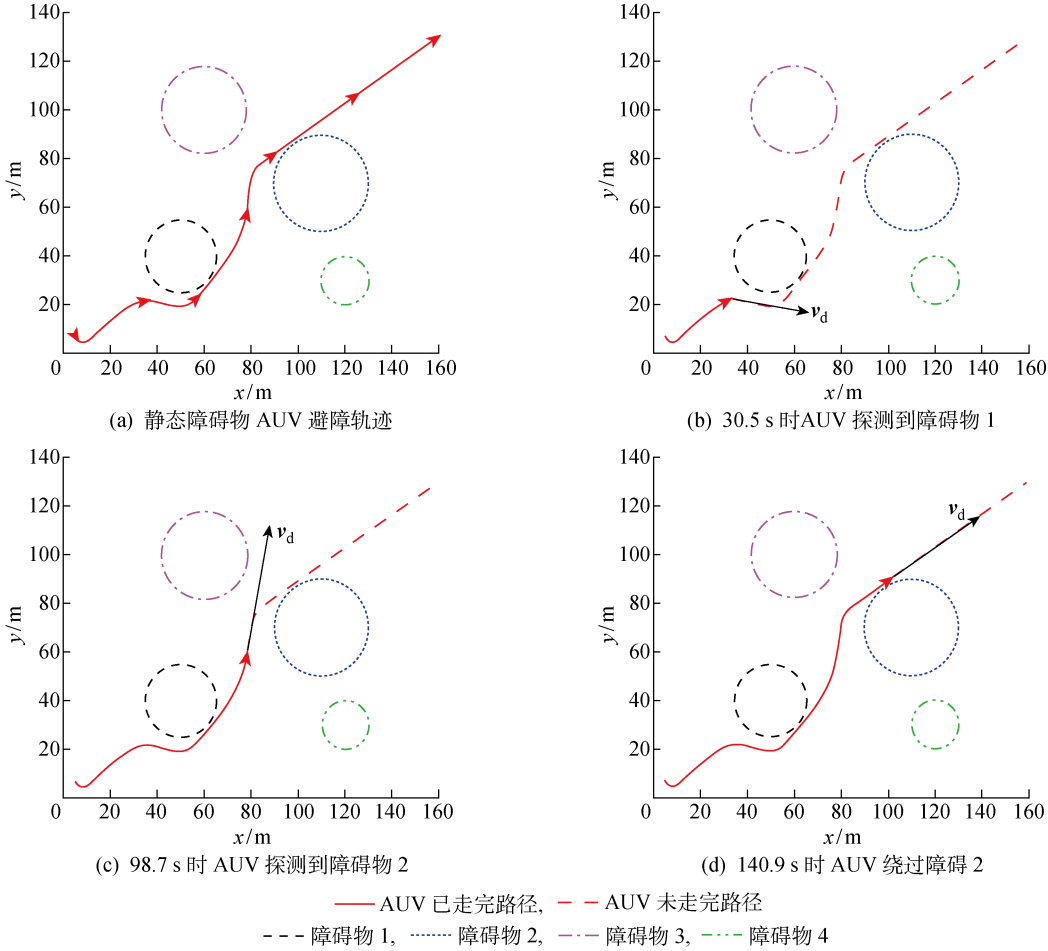


图 11 静态障碍物 AUV 避障策略图

Fig. 11 AUV collision avoidance strategy for static obstacle

$$\eta_s=[0\text{ m}\quad-20\text{ m}\quad0^\circ]^\text{T}$$
$$\eta_t=[120\text{ m}\quad140\text{ m}\quad-]^\text{T}$$

两个障碍物的位置和安全半径分别为

$$\boldsymbol{P}'_{o1}=[180\quad-20\quad25]^\text{T}\text{ m}$$
$$\boldsymbol{P}'_{o2}=[0\quad80\quad15]^\text{T}\text{ m}$$

障碍物的运动速度分别为

$$\boldsymbol{v}_{o1}=[-1.0\text{ m/s}\quad1.5\text{ m/s}\quad0^\circ]^\text{T}$$
$$\boldsymbol{v}_{o2}=[-0.8\text{ m/s}\quad0.8\text{ m/s}\quad0^\circ]^\text{T}$$

模拟结果如图 12 所示。

图 12 表明 AUV 基于 NSB 法的避障策略对于动态障碍物同样有效。如图 12(a)所示为 AUV 在驶向目标点的过程中发现动态障碍物、绕过动态障碍物并最终驶向目标点的完整路线图。如图 12(b)所示,在 10.7 s 时 AUV 探测到动态障碍物 2,根据障碍物运动方向,选择以顺时针方向绕过障碍物,并在 51.7 s 时绕过障碍物 2(见图 12(c));如图 12(d)所示,在 63.8 s 时 AUV 在继续行驶途中发现动态障碍物 1,同时启动避障算法;由图 12(e)可以看出,在 110.8 s 时 AUV 以逆时针方向绕过障碍物 1 之后

继续驶向目标点;图 12(f)所示为 AUV 驶向目标点。

情况 3 当障碍物沿 AUV 正面运动方向相向运动时,被视为正面障碍物。当 AUV 在驶向目标点的过程中遇到正面障碍物时,需要判断相对于障碍物的行驶角度,并及时选择避开障碍物的方向(逆时针或顺时针)。

设 AUV 的初始状态和目标点位置分别为

$$\eta_s=[5\text{ m}\quad7\text{ m}\quad57.32^\circ]^\text{T}$$
$$\eta_t=[150\text{ m}\quad200\text{ m}\quad-]^\text{T}$$

障碍物的初始位置和安全半径为

$$\boldsymbol{P}'_o=[150\quad200\quad20]^\text{T}\text{ m}$$

速度参数为

$$\boldsymbol{v}_o=[-1.0\text{ m/s}\quad-1.2\text{ m/s}\quad0^\circ]^\text{T}$$

模拟结果图 13 所示。

图 13(a)所示为遇到正面障碍物时 AUV 的避障轨迹图;如图 13(b)所示,在 43.7 s 时 AUV 探测到障碍物,并根据相对行驶方向判断为正面障碍物,同时启动避障算法;如图 13(c)所示,在 68.4 s 时

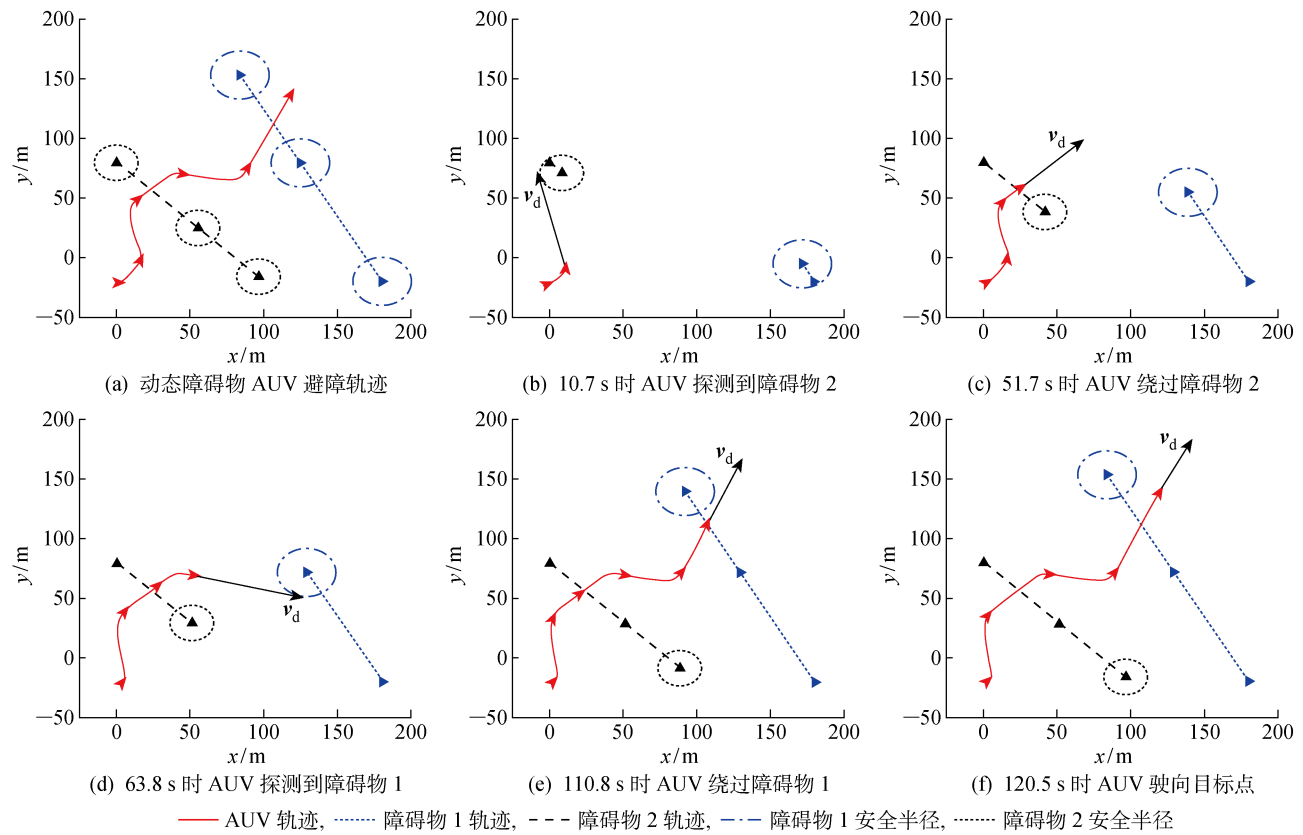


图 12 动态障碍物 AUV 避障策略图

Fig. 12 AUV collision avoidance strategy for dynamic obstacle

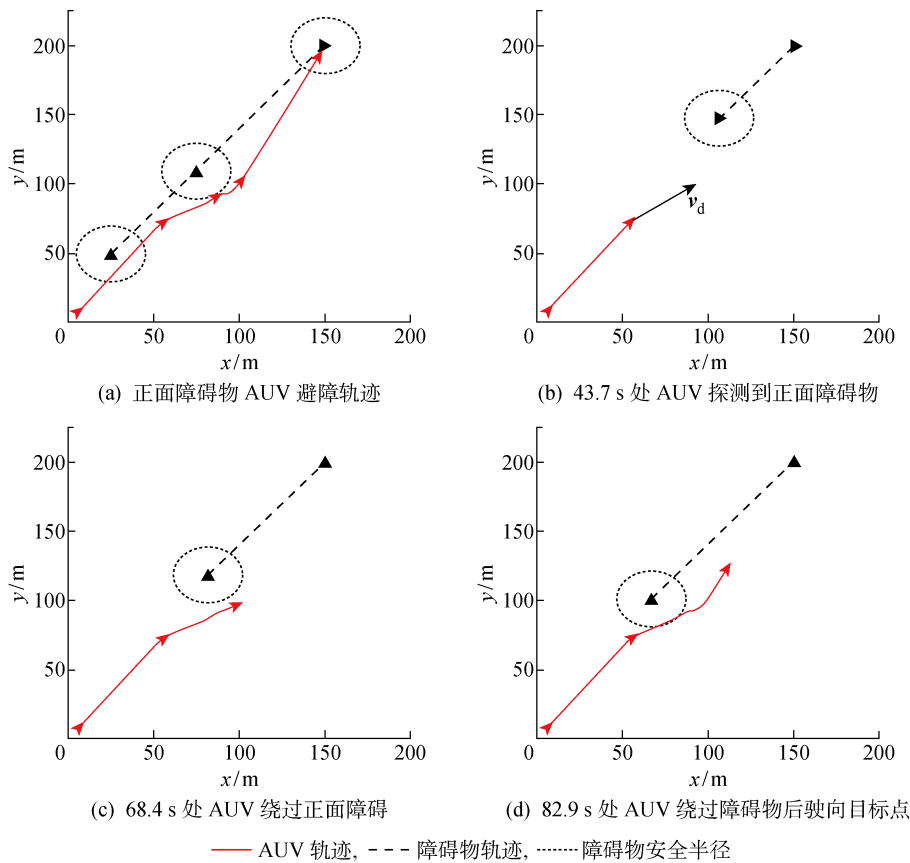


图 13 AUV 正面障碍物避障策略图

Fig. 13 AUV collision avoidance strategy for head-on obstacle

AUV 绕过正面障碍物;如图 13(d)所示,在 82.9 s 时 AUV 逆时针绕过障碍物后继续驶向目标点,验证了 NSB 算法对正面障碍物避障的可靠性。

4 结语

本文基于 NSB 法,研究分析了 AUV 对于动静态障碍物的避障问题。对于多任务目标控制,NSB 法能够有效避免各任务间冲突,出色完成避障任务。在介绍 NSB 法的基础上,针对 AUV 在驶向目标点过程中可能遇到动态和静态障碍物的情形,设计了不同的避障策略,把总体任务分解为不同等级的任务控制目标,建立了相应的输出函数,得到了 AUV 整体任务的函数输出模型。对于何时激活子任务,设置了任务管理器,以保证各控制目标顺利实现。最后利用 AUV 模型进行了仿真验证,结果表明:对于静态和动态障碍物,AUV 均能够顺利绕过障碍物最终驶向目标点,达到预期目标,验证了该方法的实用性。

文中所设计的基于 NSB 法的 AUV 避障策略,结合实验室现有 AUV 编队控制(主从式(L-F)法,图论法等)的相关积累,可开展更加深入和多方向的研究,如将该方法运用到编队避障中,也可将 NSB 法拓展至三维空间,研究 AUV 或 AUV 编队在三维空间中的避障和路径规划问题。

参考文献:

- [1] 潘无为,姜大鹏,庞永杰,等. 人工势场和虚拟结构相结合的多水下机器人编队控制[J]. 兵工学报, 2017, 38(2): 326-334.
PAN Wuwei, JIANG Dapeng, PANG Yongjie, *et al.* A multi-AUV formation algorithm combining artificial potential field and virtual structure[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(2): 326-334.
- [2] 丁家如,杜昌平,赵耀,等. 基于改进人工势场法的无人机路径规划算法[J]. 计算机应用, 2016, 36(1): 287-290.
DING Jiaru, DU Changping, ZHAO Yao, *et al.* Path planning algorithm for unmanned aerial vehicles based on improved artificial potential field[J]. *Journal of Computer Applications*, 2016, 36(1): 287-290.
- [3] 张殿富,刘福. 基于人工势场法的路径规划方法研究及展望[J]. 计算机工程与科学, 2013, 35(6): 88-95.
ZHANG Dianfu, LIU Fu. Research and development trend of path planning based on artificial potential field method[J]. *Computer Engineering and Science*, 2013, 35(6): 88-95.

- [4] 叶彬强,王一. 基于人工势场法的机器人避障算法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2012, 26(9): 82-85.
YE Binqiang, WANG Yi. Research of obstacle avoidance algorithm for robot based on artificial potential field[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2012, 26(9): 82-85.
- [5] 张洋洋,瞿栋,柯俊,等. 基于速度障碍法和动态窗口法的无人水面艇动态避障[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2017, 23(1): 1-16.
ZHANG Yangyang, QU Dong, KE Jun, *et al.* Dynamic obstacle avoidance for USV based on velocity obstacle and dynamic window method[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Sciences Edition)*, 2017, 23(1): 1-16.
- [6] 徐保来,管贻生,苏泽荣,等. 改进动态窗口法的阿克曼移动机器人局部路径规划器[J]. 机电工程技术, 2016, 45(9): 21-26.
XU Baolai, GUAN Yisheng, SU Zerong, *et al.* A modified dynamic window approach to local path planning for the Ackermann mobile robot [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2016, 45(9): 21-26.
- [7] ERIKSEN B O H, BREIVIK M, PETTERSEN K Y, *et al.* A modified dynamic window algorithm for horizontal collision avoidance for AUVs[C]// *IEEE Conference on Control Applications*. Buenos Aires, Argentina: IEEE, 2016: 499-506.
- [8] 程传奇,郝向阳,李建胜,等. 融合改进 A* 算法和动态窗口法的全局动态路径规划[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(11): 137-143.
CHENG Chuanqi, HAO Xiangyang, LI Jiansheng, *et al.* Global dynamic path planning based on fusion of improved A* algorithm and dynamic window approach[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(11): 137-143.
- [9] KIM H, KIM D, SHIN J U, *et al.* Angular rate-constrained path planning algorithm for unmanned surface vehicles[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 84: 37-44.
- [10] LIKHACHEY M, KOENIG S. A generalized framework for lifelong planning A* search [C]// *15th International Conference on Automated Planning and Scheduling*. Monterey, CA, USA: AAAI, 2008: 99-108.
- [11] 张贺,胡越黎,王权,等. 基于改进 D* 算法的移动机器人路径规划[J]. 工业控制计算机, 2016, 29(11): 73-74.
ZHANG He, HU Yueli, WANG Quan, *et al.* Path

- planning of mobile robot based on improved D* algorithm[J]. **Industrial Control Computer**, 2016, 29(11): 73-74.
- [12] WANG Z, XIANG X B. Improved Astar algorithm for path planning of marine robot[C]// **37th Chinese Control Conference**. Wuhan: IEEE, 2018: 5410-5414.
- [13] WANG Z, XIANG X B, YANG J, *et al.* Composite Astar and B-spline algorithm for path planning of autonomous underwater vehicle[C]// **7th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications**. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2017.
- [14] 徐澎. 基于行为的多 AUV 队形控制技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- XU Peng. Behavior-based formation control of multi-AUV[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [15] 甘文洋, 朱大奇. 基于行为策略的 AUV 全覆盖信度函数路径规划算法[J]. **系统仿真学报**, 2018, 30(5): 1857-1868.
- GAN Wenyang, ZHU Daqi. Complete coverage belief function path planning algorithm of autonomous underwater vehicle based on behavior strategy[J]. **Journal of System Simulation**, 2018, 30(5): 1857-1868.
- [16] 魏立新, 吴绍坤, 孙浩, 等. 基于多行为的移动机器人路径规划[J]. **控制与决策**, 2018, 34(12): 2721-2726.
- WEI Lixin, WU Shaokun, SUN Hao, *et al.* Mobile robot path planning based on multi-behaviors[J]. **Control and Decision**, 2018, 34(12): 2721-2726.
- [17] 高剑, 李勇强, 徐德民, 等. 基于行为的自主水下航行器无碰路径跟踪控制[J]. **大连海事大学学报**, 2012, 38(4): 30-34.
- GAO Jian, LI Yongqiang, XU Demin, *et al.* Behavior-based collision free path following control of an autonomous underwater vehicle[J]. **Journal of Dalian Maritime University**, 2012, 38(4): 30-34.
- [18] ROSALES C, LEICA P, SARCINELLI-FILHO M, *et al.* 3D formation control of autonomous vehicles based on null-space[J]. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, 2016, 84(1/2/3/4): 453-467.
- [19] 程玉虎, 易建强, 赵冬斌. 机器人行为协调机制研究进展[J]. **机器人**, 2004, 26(2): 187-192.
- CHENG Yuhu, YI Jianqiang, ZHAO Dongbin. The progress of the behavior coordination mechanism for robots[J]. **Robot**, 2004, 26(2): 187-192.
- [20] 邬林波. 基于 NSB 方法的多机器人编队控制[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- WU Linbo. Multi-robots formation control based on null-space-based method [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [21] ANTONELLI G, ARRICHIELLO F, CHIAVERINI S. The null-space-based behavioral control for autonomous robotic systems[J]. **Intelligent Service Robotics**, 2008, 1(1): 27-39.
- [22] DO K D, PAN J. Control of ships and underwater vehicles: Design for underactuated and nonlinear marine systems[M]. UK: Springer Science & Business Media, 2009.

(本文编辑:黄伟)