

1-3-2019

## Complete Coverage Belief Function Path Planning Algorithm of Autonomous Underwater Vehicle Based on Behavior Strategy

Wenyang Gan

*Laboratory of Underwater Vehicles and Intelligent Systems, Shanghai 201306, China.;*

Daqi Zhu

*Laboratory of Underwater Vehicles and Intelligent Systems, Shanghai 201306, 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.

---

# Complete Coverage Belief Function Path Planning Algorithm of Autonomous Underwater VehicleBased on Behavior Strategy

## Abstract

**Abstract:** For the complete coverage path planning of autonomous underwater vehicle (AUV), *a complete coverage belief function path planning algorithm based on behavior strategy is proposed by introducing the behavior strategy and using the concept of map belief function, which can make AUV accomplish the complete coverage and avoid obstacles automatically.* The grid belief function is constructed based on environmental information, using different function values to distinguish between the obstacle, the covered and the uncovered grid. AUV selects the next navigation position by path planning strategy. Next navigation position is selected by behavior strategy if AUV navigates to the edge of obstacle. Otherwise, belief function is used to select navigation position of AUV. By simulation experiments in 2-D and 3-D environment, the algorithms mentioned in this paper is proved to be capable of accomplishing the complete coverage, decreasing the number of AUV into dead zone and reducing the overlay repetition rate.

## Keywords

autonomous underwater vehicle (AUV), complete coverage path planning, belief function, behavior strategy

## Recommended Citation

Gan Wenyang, Zhu Daqi. Complete Coverage Belief Function Path Planning Algorithm of Autonomous Underwater VehicleBased on Behavior Strategy[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1857-1868.

# 基于行为策略的 AUV 全覆盖信度函数路径规划算法

甘文洋, 朱大奇

(上海海事大学水下机器人与智能系统实验室, 上海 201306)

**摘要:** 针对自治水下机器人全覆盖路径规划问题, 通过引入行为策略, 结合地图信度函数概念, 提出一种基于行为策略的全覆盖信度函数路径规划算法, 使 AUV 完成全覆盖任务的同时自动避开障碍物。根据环境信息构建栅格信度函数, 用不同的函数值区分障碍物、已覆盖和未覆盖栅格; AUV 根据路径规划策略选择下一步航行位置, 若 AUV 航行到障碍物边缘, 则利用行为策略选择下一步航行位置, 否则使用栅格信度函数选择下一步航行位置。通过二维和三维仿真实验证明了所提算法不仅能够完成全覆盖任务, 同时减少了 AUV 陷入死区的次数, 降低了遍历重复率。

**关键词:** 自治水下机器人; 全覆盖路径规划; 信度函数; 行为策略

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 05-1857-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201805031

## Complete Coverage Belief Function Path Planning Algorithm of Autonomous Underwater Vehicle Based on Behavior Strategy

Gan Wenyang, Zhu Daqi

(Laboratory of Underwater Vehicles and Intelligent Systems, Shanghai 201306, China.)

**Abstract:** For the complete coverage path planning of autonomous underwater vehicle (AUV), a complete coverage belief function path planning algorithm based on behavior strategy is proposed by introducing the behavior strategy and using the concept of map belief function, which can make AUV accomplish the complete coverage and avoid obstacles automatically. The grid belief function is constructed based on environmental information, using different function values to distinguish between the obstacle, the covered and the uncovered grid. AUV selects the next navigation position by path planning strategy. Next navigation position is selected by behavior strategy if AUV navigates to the edge of obstacle. Otherwise, belief function is used to select navigation position of AUV. By simulation experiments in 2-D and 3-D environment, the algorithms mentioned in this paper is proved to be capable of accomplishing the complete coverage, decreasing the number of AUV into dead zone and reducing the overlay repetition rate.

**Keywords:** autonomous underwater vehicle (AUV); complete coverage path planning; belief function; behavior strategy

## 引言

AUV 全覆盖路径规划是在水下工作区域内寻



收稿日期: 2016-06-20 修回日期: 2016-10-19;  
基金项目: 国家自然科学基金(51279098, 51575336),  
上海市科委创新行动计划(13510721400);  
作者简介: 甘文洋(1992-), 女, 安徽安庆, 博士生,  
研究方向为 AUV 自适应全覆盖路径规划; 朱大奇  
(通讯作者 1964-), 安徽安庆, 博士, 教授, 研究方向  
为水下机器人控制与路径规划。

找一条从始点到终点且经过所有可达点的连续的无碰撞路径, 它在水下搜索与军事领域有广泛应用。AUV 全覆盖路径规划主要解决三个问题<sup>[1-3]</sup>: 1、能够遍历水下工作区域内除障碍物以外的全部地方; 2、在航行过程中能够避开障碍物; 3、在遍历过程中要尽量避免路径的重复。近年来, 对于地面移动机器人路径规划的研究已经取得了一系列的研究成

<http://www.china-simulation.com>

• 1857 •

果,但水下机器人路径规划与安全航行的研究成果却非常有限。和地面移动机器人路径规划相比,水下环境与一般地面环境有本质的区别:首先,地面环境可以不考虑气流对机器人运动的影响,但水下环境中海流的影响很大,而且海流还是动态时变的;其次,在地面移动机器人路径规划中,可以应用多种传感器进行目标探测与识别,而水下机器人由于本身载荷及深海作业环境的限制,传感器资源较少,这必然影响机器人对目标和障碍物的准确判定;最后,和地面环境相比,水下噪声的干扰也更频繁、更严重。这一切使得移动机器人水下路径规划比地面路径规划更加复杂。

移动机器人路径规划算法研究目前取得了重要进展,但大多数研究都是针对陆地工作的智能机器人,而针对水下机器人的路径规划研究算法则比较有限,越来越多的学者将地面移动机器人路径规划算法应用到AUV上,但考虑到水下环境的复杂性和不可预测性,算法的实现和验证有着较大的困难,所以对于AUV路径规划算法大多数停留在仿真阶段。从对以往学者的仿真研究中可以总结出,目前,AUV全覆盖路径规划方法主要有:模板匹配法<sup>[4-9]</sup>、随机遍历法<sup>[10-14]</sup>、单元分解法<sup>[15-19]</sup>、神经网络法<sup>[20-24]</sup>等。

模板匹配方法是将当前的规划任务和环境信息与模板库中的模板进行匹配,寻找最优的匹配模板,然后根据实际环境对该模板进行修正,以此规划出全覆盖路径<sup>[8]</sup>。该方法原理简单,易于实现区域全覆盖,但是需要建立足够大的模板库,如遇到没有和工作环境相匹配的模板则很难实现全覆盖。对此,随机遍历规划方法可以有一定弥补作用<sup>[14]</sup>,它采用协调和随机机制规定机器人在无法直行时随机旋转某一角度继续直行,直至将整个区域覆盖完成。随机遍历规划方法实现简单,能够实现全覆盖,但往往仅考虑某一任务指标,存在时间开销大、资源消耗严重、遍历重复率高和智能化程度低等缺陷。

单元分解法<sup>[15]</sup>是以障碍物为边界,将空闲区域分解为若干个互不重叠的自由单元,机器人在自由单元中做往返运动,并通过邻接图来表示从一个

单元到另一个单元的转移。但是单元分解须依据具体环境,在复杂环境下,单元分解增多致使遍历重复率较高;机器人在不相邻单元之间移动时的重复遍历区域得不到有效控制。

随着人工智能技术的发展,神经网络以其记忆联想、非线性等智能特性,在机器人路径规划具有实际应用。为了降低遍历重复率,S. X. Yang<sup>[22]</sup>将生物启发神经网络引用到移动机器人路径规划中,该算法是一种新颖的路径规划方法,将需要全覆盖的二维栅格地图单元与生物启发神经网络的神经元一一对应起来,机器人实现全覆盖的实时路径是由神经元的活性值和机器人的上一位置产生的;随后D. Q. Zhu等<sup>[23-24]</sup>进一步将生物启发神经网络与信息融合地图构建算法结合,将其应用到水下机器人AUV全覆盖路径规划之中。由于生物启发神经网络的无学习、自适应等特殊性质,使得该算法能够有效降低遍历重复率,同时可以自动避障、逃离死区,但是基于生物启发神经网络的全覆盖算法,也存在计算量大,时间开销大的缺陷。

对此本文提出一种基于行为策略和地图信度函数的全覆盖路径规划算法,该算法包括地图信度函数定义、路径规划算法和躲避障碍物的行为策略三个部分。仿真实验证明本文提出的基于行为策略的AUV全覆盖信度函数路径规划算法,路径重复率低,不仅能够有效地遍历工作区域,并且能够避免死区的频繁出现,提升逃离死区效率。

## 1 基于行为策略的全覆盖信度函数路径规划算法

基于行为策略的全覆盖信度函数路径规划算法综合了栅格信度函数和行为策略。本节将从信度函数、行为策略和路径规划策略3个方面对算法进行介绍。

### 1.1 二维全覆盖信度函数路径规划算法

#### 1.1.1 栅格信度函数

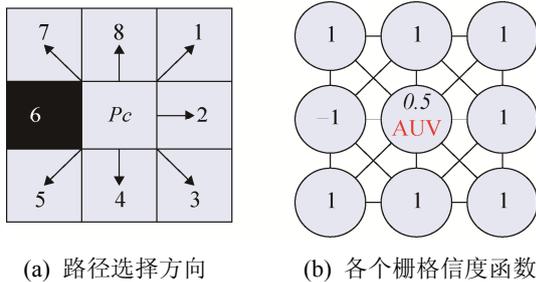
栅格信度函数包括位置信度函数和方向信度函数。位置信度函数用于确定栅格地图中每个栅格

的状态;方向信念函数用于控制 AUV 航行的方向,使其始终向着未覆盖的方向航行。

(1) 位置信念函数

将机器人的工作空间环境分解为互相连接且不重叠的空间单元,这些单元称作栅格(cell)。为了避免 AUV 对同一栅格单元进行重复覆盖以及判断是否完成全覆盖,根据栅格性质对栅格单元进行赋值。图 1(a)表示一个二维的栅格地图,其工作区域被分成了 9 个栅格,中间的 Pc 表示 AUV 当前位置,周围八个栅格表示 AUV 下一步可能的航行位置,其中黑色栅格表示障碍物,白色栅格表示自由空间。根据式(1)来对位置信念函数  $x_j$  进行赋值,图 1(b)则是按照式(1)对图 1(a)栅格进行赋值的示意图。

$$x_j = \begin{cases} 1 & ; \text{若该栅格未覆盖} \\ 0.5 & ; \text{若该栅格已覆盖} \\ -1 & ; \text{若该栅格为障碍物} \end{cases} \quad (1)$$



(a) 路径选择方向 (b) 各个栅格信念函数

图 1 栅格地图表示及赋值

Fig. 1 Grid map representation and assignment

(2) 方向信念函数

为了控制 AUV 的航行方向,在位置信念函数  $x_j$  的基础上引入方向信念函数  $y_j$ 。  $y_j$  定义为:

$$y_j = \begin{cases} 1 - \frac{\Delta\theta_j}{\pi}, & \text{若AUV未陷入死区} \\ \cos\Delta\psi_j, & \text{若AUV陷入死区} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中方向信念函数的定义分为两种情况,当 AUV 未陷入死区时,  $y_j$  是 AUV 当前位置与下一位置连线与当前航行方向的角度之差  $\Delta\theta_j$  的函数,是前一位置  $p_p$ 、当前位置  $p_c$  和可能为下一位置  $p_j$  坐标的函数。此时方向信念函数为  $y_j = 1 - \frac{\Delta\theta_j}{\pi}$ ,  $\Delta\theta_j$  表示为:

$$\Delta\theta_j = \left| \theta_j - \theta_c \right| = \left| a \tan 2(y_{p_j} - y_{p_c}, x_{p_j} - x_{p_c}) - a \tan 2(y_{p_p} - y_{p_c}, x_{p_p} - x_{p_c}) \right| \quad (3)$$

式中:  $(x_{p_c}, y_{p_c})$ 、 $(x_{p_p}, y_{p_p})$ 和 $(x_{p_j}, y_{p_j})$ 分别为地图上 AUV 的当前位置、前一步和下一步的位置坐标;  $\Delta\theta_j \in [0, \pi]$ , 如图 2 所示,若  $\Delta\theta_j=0$ ,则自治水下机器人 AUV 沿着直线航行, AUV 无需转向,消耗能量最少,最可信;若  $\Delta\theta_j=\pi$ ,则往相反方向航行, AUV 转向角度最大,消耗能量最多,尽力避免。

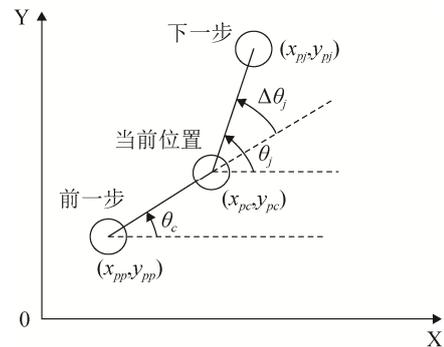


图 2 未陷入死区方向信念函数

Fig. 2 Direction belief function when not falling into the dead zone

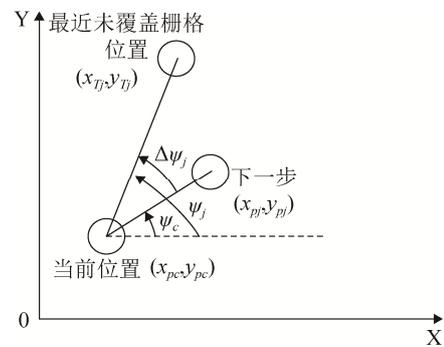


图 3 陷入死区方向信念函数

Fig. 3 Direction belief function when falling into the dead zone

当 AUV 陷入死区时,它的周边相邻区域,或者是边界,或者是障碍物,或者是已覆盖过的区域。只有从死区逃离出来,才能继续完成全覆盖任务。当陷入死区后, AUV 不再以当前位置与下一步位置连线与当前航行方向的角度之差作为方向向导,而是将当前位置与距离最近未覆盖栅格位置和下一步位置的角度差作为航行的方向向导,引导

AUV 沿已覆盖栅格航行, 快速逃离死区。AUV 陷入死区后的方向信度函数定义为  $y_j = \cos \Delta \psi_j$ , 其中航行方向角之差  $\Delta \psi_j$  为:

$$\Delta \psi_j = \left| \psi_j - \psi_c \right| = \left| a \tan 2(y_{T_j} - y_{p_c}, x_{T_j} - x_{p_c}) - a \tan 2(y_{p_j} - y_{p_c}, x_{p_j} - x_{p_c}) \right| \quad (4)$$

式中:  $\Delta \psi_j$  是关于 AUV 当前位置和下一可能位置连线与 AUV 当前位置和最近未覆盖栅格连线夹角, 如图 3 所示。( $x_{T_j}, y_{T_j}$ ) 为距离当前位置最近未覆盖栅格的位置。式中  $\Delta \psi_j \in [0, \pi]$ , 当前位置与最近未覆盖栅格位置和下一步位置的角度差越小, 方向信度函数越大, 使得 AUV 航行方向始终指向最近未覆盖的栅格。

### (3) 栅格信度函数

为了完成工作区域的全覆盖, 根据位置信度函数和方向信度函数, 定义一个综合栅格信度函数  $F_j$ , 其定义为:

$$p_j \Leftarrow F_j = \max \{x_j + cy_j, j=1, 2, \dots, k\} \quad (5)$$

式中:  $p_j$  表示 AUV 下一个行驶位置;  $c$  是一个权值常数,  $0 < c < 1$ ;  $k$  是与当前栅格  $p_c$  相邻的栅格个数。根据公式(5)可以发现栅格信度函数同时考虑了栅格的状态位置和 AUV 转向。

#### 1.1.2 障碍物边缘的行为策略

信度函数利用栅格本身状态和 AUV 方向改变最小原则来规划 AUV 航行路径, 虽然信度函数能够实现全覆盖, 也能够逃离死区, 但是如果只依靠信度函数规划路径会出现 AUV 频繁陷入死区的情况。为了进一步优化 AUV 覆盖路径, 使 AUV 航行路径整齐、降低路径重复率, 在信度函数的基础上引入行为策略。行为策略规定 AUV 在对区域进行全覆盖过程中以弓形路径航行, 当 AUV 航行到障碍物边缘时采用图 4 所示的四种行为策略优化覆盖路径。

图 4 中,  $P_c$  为 AUV 当前位置,  $P_p$  为 AUV 上一时刻位置, AUV 当前位置周围 8 个位置从左下角开始进行顺时针编号。当 AUV 从下往上运动, 若上方存在障碍物, AUV 选择右方的栅格作为下

一步航行的位置, 如图 4(a)所示; 当 AUV 从下往上移动, 若左下方存在障碍物, 且左侧存在未搜索区域, 则优先访问左侧区域, 如图 4(b)所示; 当 AUV 从上往下运动, 若左上方存在障碍物, 且左侧存在未搜索区域情况, 此时优先访问左侧区域, 如图 4(c)所示; 当 AUV 从右往左移动, 若右下方存在障碍物, 且下方存在未搜索区域情况, 此时优先访问下方区域, 如图 4(d)所示。

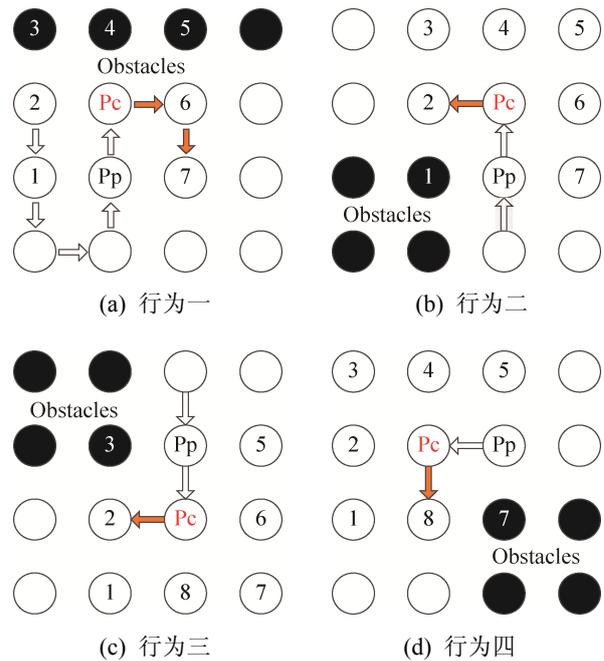


图 4 障碍物边缘的行为策略  
Fig. 4 Behavior strategy for obstacle edge

#### 1.1.3 路径规划策略

全覆盖路径规划问题在栅格地图中转化为寻找 AUV 下一航行位置  $P_j$  的问题, 基于行为策略的全覆盖信度函数路径规划将这个问题分为两个部分, 若 AUV 行驶到障碍物边缘, 则使用行为策略来确定 AUV 下一航行位置; 否则利用栅格信度函数, 确定 AUV 下一航行位置。AUV 路径规划策略流程描述如下:

设置 AUV 的起点位置;

AUV 选择下一步航行位置;

While (未搜索区域完全覆盖)

If AUV 航行到障碍物边缘且不是死区 then

If 前方有障碍物 then  
 $P_j$  由“行为一”策略确定;  
 Else if AUV 从下往上移动, 左下方有障碍物 then  
 $P_j$  由“行为二”策略确定;  
 Else if AUV 从上往下运动, 左上方有障碍物 then  
 $P_j$  由“行为三”策略确定;  
 Else AUV 从右往左移动, 右下方有障碍物 then  
 $P_j$  由“行为四”策略确定;  
 End If  
 Else  

$$p_j \leftarrow F_j = \max \{x_j + cy_j, j = 1, 2, \dots, k\}$$
  
 End If  
 End While

通过上述路径规划策略选择的 AUV 下一步航行位置不仅考虑了障碍物对全覆盖的影响, 而且考虑了 AUV 的航向, 下一节将通过仿真实验验证该策略的有效性。

本文所提算法是在已知地图的前提下进行全覆盖路径规划, 判断 AUV 是否实现全覆盖的依据是所有栅格的位置信度函数  $x_j$  都不为 1, 这时则可以认为 AUV 实现全覆盖。信度函数根据公式(1)、(2)、(3)、(4)和(5)计算周围八个点的信度值, 选择最大值方向作为下一步走向, 若出现两点或以上点同为最大值, 则遵守方向改变最小原则来选择下一步走向。在信度函数中定义了两种方向信度函数, 在未陷入死区情况下, AUV 保持弓形路线进行路径规划; 一旦陷入死区, 若还是使用之前的方向信度函数会使 AUV 路径规划产生较多的重复覆盖, 本文则针对陷入死区情况提出一种新的方向信度函数, 在已知地图上, 该方向信度函数会指导 AUV 生成最短路径来逃离死区、前往未覆盖区域。本文所提算法在信度函数的基础上加入行为策略来优化路径, 减少重复覆盖, 提高效率和实时性。综合信度函数和行为策略可以使地图上所有栅格的位

置信度函数都不为 1, 如果地图上有存在栅格位置信度函数为 1, 则在已知地图中, AUV 会始终朝着该未覆盖的栅格航行, 继而完成全覆盖。

## 1.2 三维全覆盖信度函数路径规划算法

在水下环境中, 区域平面探索是一种难度较大的水下任务需求, 它要求 AUV 下潜到某一深度, 对该深度的平面进行全覆盖探测, 三维全覆盖探索则要求 AUV 对整个三维水下空间进行全覆盖式探测(这种情形下, AUV 一般将任务分解到不同深度的水平面内来实现)。本节在二维全覆盖信度函数路径规划的基础上, 将其拓展至三维情况; 将三维全覆盖路径规划分解到不同深度的二维全覆盖路径规划。三维环境下的全覆盖路径规划流程图如图 5 所示。

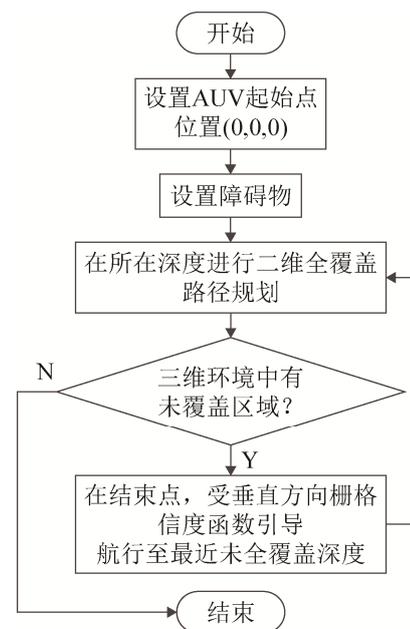


图 5 三维全覆盖路径规划流程图

Fig. 5 Flow chart of 3D complete coverage path planning

在任务区域内, AUV 从初始点出发, 在任务区域最低深度开始规划二维全覆盖路径, 更新所有地图栅格的信度函数值(障碍物为-1, 已覆盖栅格为 0.5, 未覆盖栅格为 1)。覆盖完最低深度平面, 在结束点处垂直方向受栅格的信度函数值引导, 航行至最近的未全覆盖深度, 在此深度进行二维全覆盖路径规划, 一直循环此过程, 直至三维环境下自由区

域被完全覆盖,则三维环境的全覆盖路径规划完成。

## 2 仿真实验

仿真实验首先将水下环境抽象化成规格化的  $25 \times 25$  的二维栅格地图进行二维环境仿真实验,然后给出接近水下真实环境的  $10 \times 10 \times 10$  的三维栅格地图进行三维环境仿真实验。二维地图中随机的分布着大小各异的障碍物(黑色栅格表示),此外为自由空间(白色栅格表示);三维地图中随机分布着体积形状各异的障碍物(黄色立方体表示),此外为自由空间(白色立方体表示),仿真实验中将 AUV 视为一个质点,不考虑其大小和形状,同时假设 AUV 是可以全方位运动的。所有的仿真实验设置参数  $c=0.5$ 。通过二维静态、动态和三维静态环境中仿真实验,证明本文提及的行为策略全覆盖路径规划算法能够自动避开障碍物、逃离死区完成对工作区域的全覆盖。通过与信度函数全覆盖路径规划算法和生物启发神经网络算法在总航程时间、陷入死区次数、步长和区域重复覆盖率的对比,证明本文提及算法提高了全覆盖的效率。

### 2.1 二维静态环境

在静态环境的仿真实验中,考虑障碍物是静止的。图 6(a)即为 AUV 未移动时的初始状态,AUV 起点位置在(1,1),工作区域随机分布着矩形、U型、L型和横条形状的不规则障碍物,分别编号为障碍物 1~13。当 AUV 在航行过程中没有遇到障碍物且没有陷入死区时,使用方向信度函数为  $y_j = 1 - \frac{\Delta\theta_j}{\pi}$  的栅格信度函数来确定 AUV 下一步的移动位置,如图 6(b)所示。

当 AUV 航行到前方有障碍物时,利用“行为一”策略来规划 AUV 下一步航行位置,如图 6(c);“行为一”策略的具体路径规划用圆圈标注显示;当 AUV 从下往上航行且左下方有障碍物时,利用“行为二”策略规划 AUV 下一步航行位置,如图 6(d);当 AUV 从右往左航行且右下方有障碍物时,AUV 下一步航行位置由“行为四”策略确定,如图 6(e);

当 AUV 从上往下航行且左上方有障碍物时,AUV 下一步走向则由“行为三”策略确定,如图 6(f)。

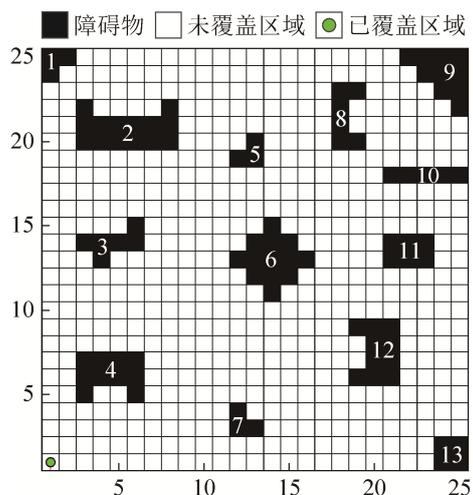
AUV 在航行至(15,15)位置时陷入死区,根据算法原理 AUV 为了能够快速逃离死区,方向信度函数值将根据  $y_j = \cos\Delta\psi$  进行计算,逃离死区的轨迹如图 6(g)蓝色线段所示,AUV 逃出死区后,方向信度函数将重新按照  $y_j = 1 - \frac{\Delta\theta_j}{\pi}$  进行计算,继续对区域进行覆盖,完成区域全覆盖,如图 6(h)所示。通过上述仿真实验和分析可知,本文所提算法既能保证 100%覆盖率,而且能够有效地快速逃离死区,提高路径覆盖效率。

### 2.2 二维动态环境

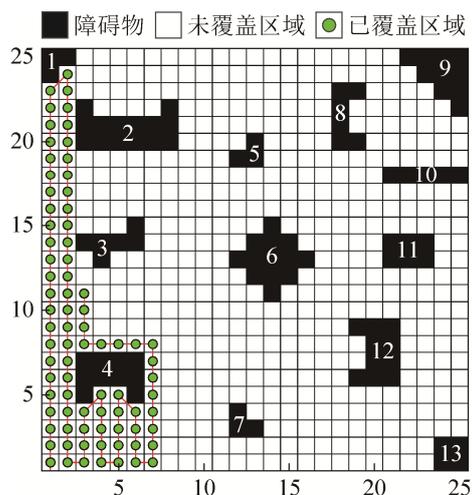
环境空间中,有些情况下存在动态障碍物,这对于机器人的路径规划具有不容忽视的影响,动态障碍物的出现不仅威胁 AUV 安全,还会妨碍其对整个环境空间的全覆盖效果。本节利用本文提及的算法能够较好完成动态障碍物下的全覆盖路径规划。障碍物初始状态如图 7(a)所示,AUV 从(1,1)位置开始进行全覆盖任务。

障碍物 6 为动态障碍物,在 AUV 航行的前一段时间内占据着一部分工作区域,AUV 将无法对其进行覆盖,如图 7(b)所示。当 AUV 航行了 500 步后,障碍物 6 将离开,相应部分工作区域的栅格信度函数值  $x_j$  由原来的-1(障碍物)变为 1(未覆盖栅格),当 AUV 行至(24,9)点时,AUV 已经遍历了除障碍物 6 形成的未搜索区域以外的所有工作区域,此时 AUV 采用  $y_j = \cos\Delta\psi_j$  方向信度函数策略,以尽快到达未覆盖的区域,前往轨迹如图 7(c)中蓝色线段所示。到达未覆盖区域后,AUV 恢复为  $y_j = 1 - \frac{\Delta\theta_j}{\pi}$  的方向信度函数规则,继续执行区域覆盖任务直至完成全覆盖,最终路径效果见图 7(d)。

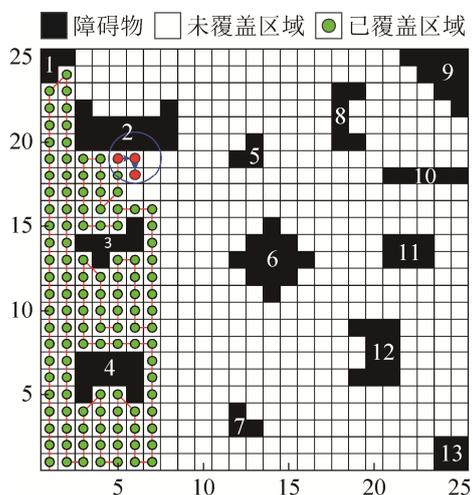
由此可见,栅格信度函数值能够随着环境信息的变化而变化,从而引导 AUV 完成动态环境全覆盖任务。因此,本文提及的算法不仅能够对静态区域进行全覆盖,而且对动态区域也能完全覆盖。



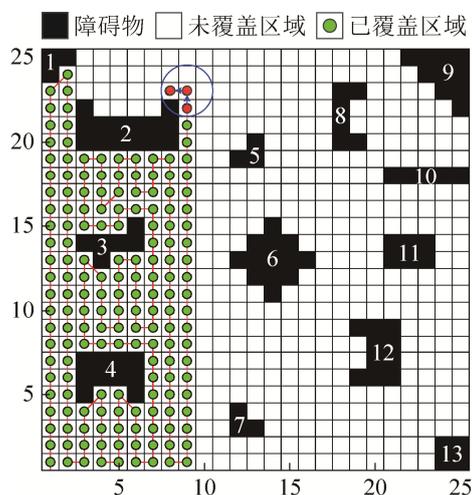
(a) 工作区初始状态



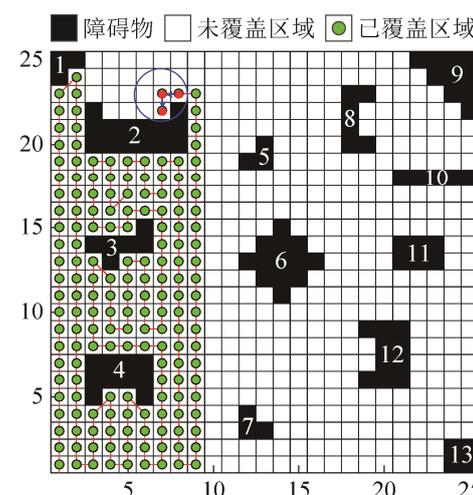
(b) 信度函数规划路径



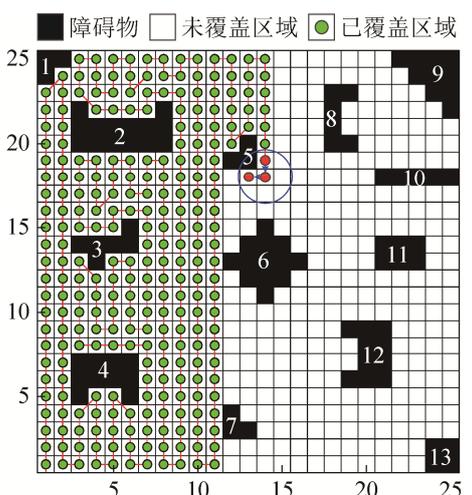
(c) 行为一策略



(d) 行为二策略



(e) 行为四策略



(f) 行为三策略

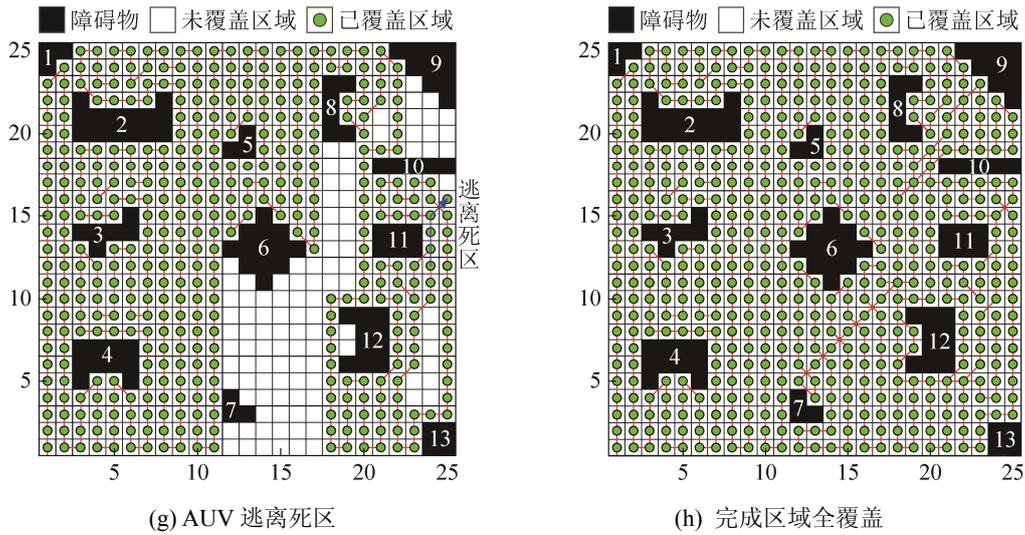


图6 静态环境中的AUV全覆盖路径规划  
Fig. 6 Complete coverage path planning of AUV in a static environment

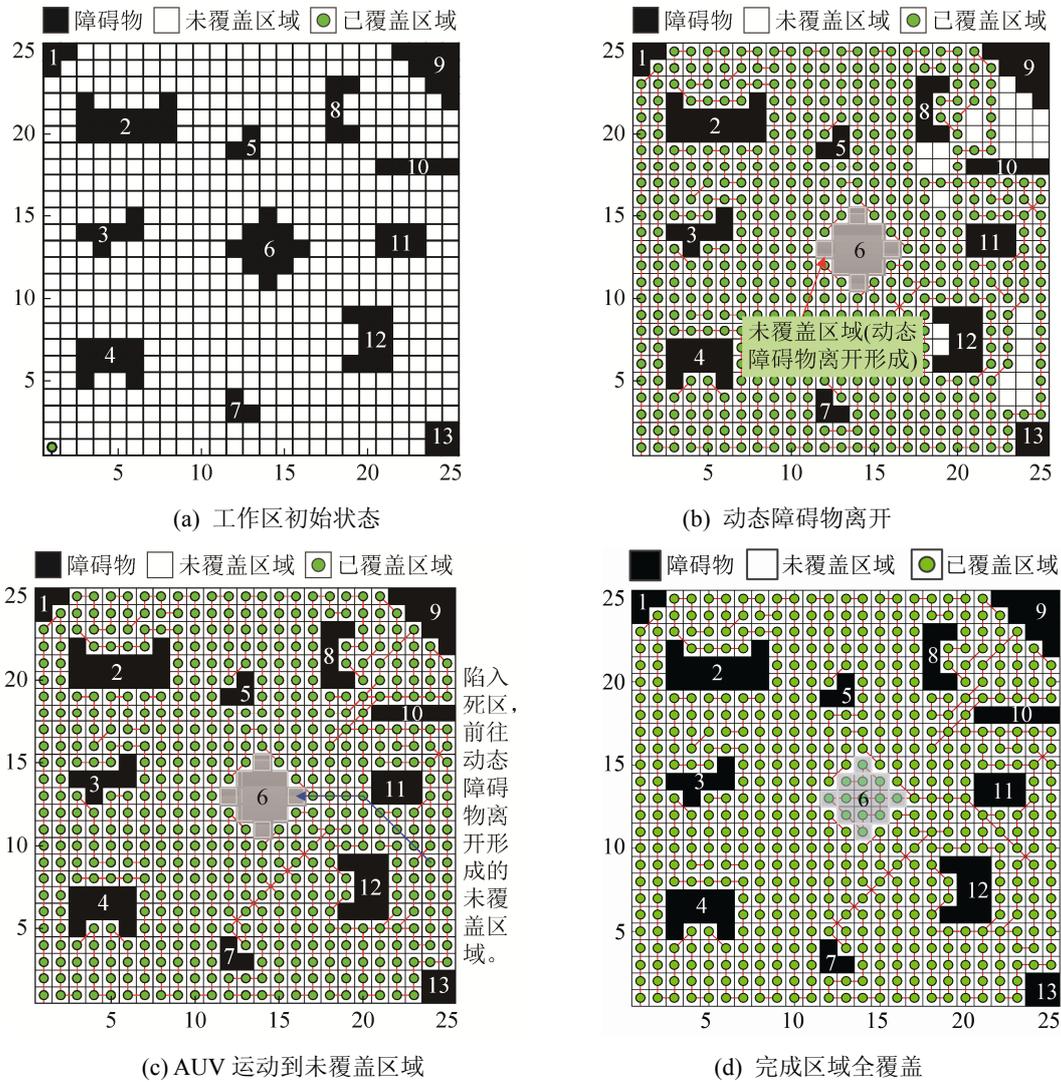


图7 动态环境中的AUV全覆盖路径规划  
Fig. 7 Complete coverage path planning of AUV in a dynamic environment

<http://www.china-simulation.com>

### 2.3 三维静态环境

AUV 实际工作环境是一个水下的三维空间, 为了使仿真实验更加接近水下环境, 直接对工作空间进行栅格化处理, 每个栅格为  $1 \times 1 \times 1$  的立方体单元空间, 环境中的障碍物或目标, 在地图上以不同状态值的栅格表示。图 8 显示了一幅  $10 \times 10 \times 10$  规模的地图, 环境信息已知, 地图空间中有 4 个障碍物(黄色立方体表示), 分别编号为 1, 2, 3, 4。

图 9 中, AUV 初始点为(1, 1, 1), 在  $z=1$  深度, AUV 使用基于行为策略的信度函数全覆盖路径规划算法可以实现二维全覆盖路径规划且避开障碍物, 在该深度的结束点为(10, 1, 1), 更新地图信息(障碍物栅格信度函数值为-1, 已搜索栅格信度函数值为 0.5, 未搜索栅格信度函数值为 1); 在(10, 1, 1)点垂直方向寻找信度函数值为 1 且距离当前位置最近栅格, 即(10, 1, 2), 也即 AUV 到达  $z=2$  深度, 在此深度进行二维全覆盖, 其结束点为(3, 1, 2)。

重复上述过程, 直至完成所有深度的二维全覆

盖路径规划, 即完成水下环境三维全覆盖路径规划, 见图 10。从图 10 可以看出, AUV 在每一深度可以实现二维避障, 那么在此基础上, 该算法也可以实现 AUV 的三维避障。通过仿真和分析, 本文所提及算法不仅能够对二维环境区域进行全覆盖路径规划和自动避障, 而且对三维环境下的全覆盖路径规划和自动避障也是有效可行的。

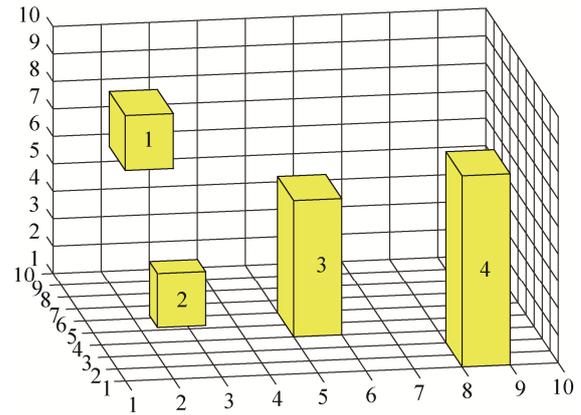


图 8 三维初始环境  
Fig. 8 3D initial environment

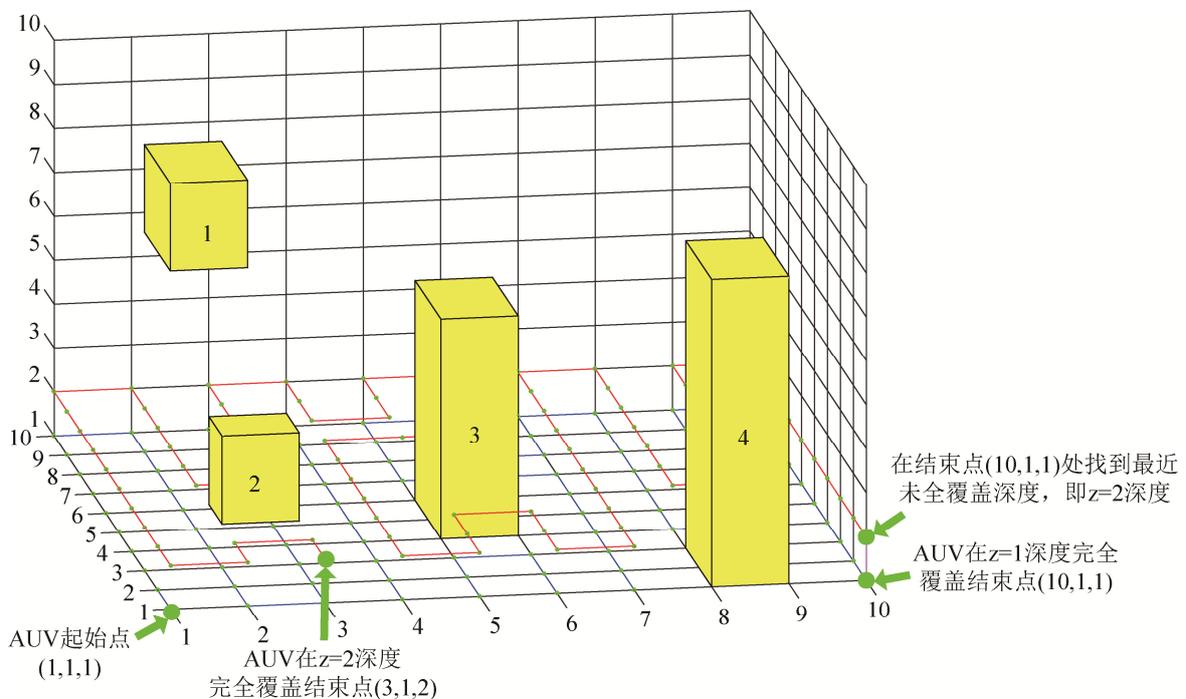


图 9 三维路径规划示意图  
Fig. 9 Sketch map of 3D complete coverage path planning

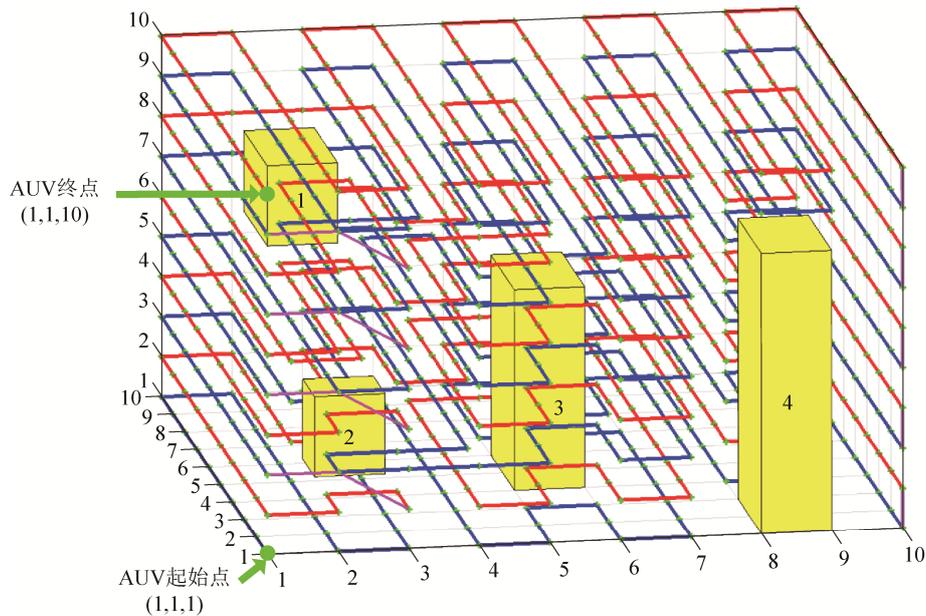


图 10 三维全覆盖路径规划

Fig. 10 3D complete coverage path planning of AUV

## 2.4 不同算法比较

在区域全覆盖任务中,可以利用区域的覆盖率、区域重复覆盖率、AUV的总航程或时间以及陷入死区的次数等指标来评价AUV的路径规划策略的性能。区域覆盖率指标要求AUV在路径规划中能尽可能覆盖所有非障碍物阻碍的可达区域。区域重复覆盖率指标一般期望在满足覆盖率的基础上尽可能减少重复覆盖。AUV完成区域全覆盖所用的总航程或者时间以及陷入死区次数一般要求越少越好。

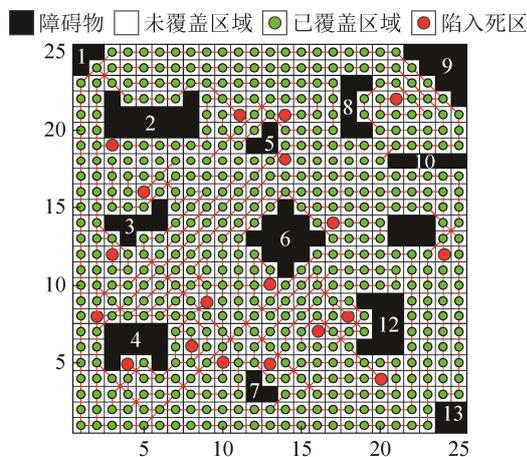
由于三维全覆盖路径规划是二维全覆盖路径规划的叠加,所以在本章节中不同算法的比较采用二维环境下的全覆盖路径规划效果来进行对比。图11显示了三种不同算法对 $25 \times 25$ 大小,存在不规则障碍物区域进行全覆盖路径规划的结果。未加入行为策略的路径规划效果如图11(b)所示;加入行为策略的路径规划效果如图11(c)所示,生物启发神经网络算法<sup>[25]</sup>的路径规划效果如图11(a)所示。三种路径规划方法进行效果对比的评价指标如表1所示。

通过图11和表1的结果可知,虽然3种方法的区域覆盖率均达到100%,但从其他指标可以看出,本文提及的算法更高效,陷入死区的次数降低

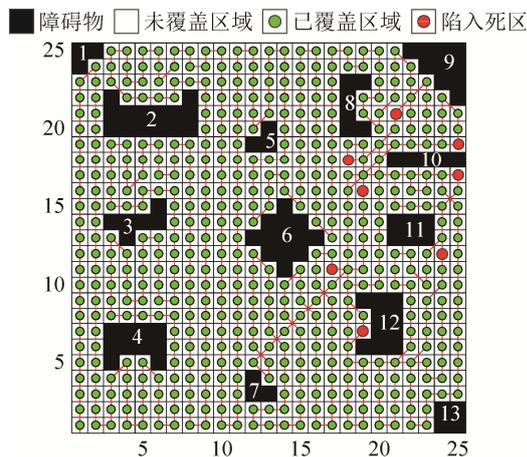
了,能够节约资源,节省时间。未加入行为策略的全覆盖路径规划整体是螺旋型路线,容易陷入死区,逃离死区的路径比较单一,容易产生重复覆盖,甚至有栅格被重复覆盖了两次。生物启发神经网络算法的全覆盖路径规划由于要利用微分来计算活性值,导致该方法计算量大,实时性不够理想。

而本文提及的算法在AUV航行过程中利用四种行为方式来优化路径,减少了重复覆盖,在AUV陷入死区后能通过调用信度函数的方法逃离死区。行为策略的引入使得未加入行为策略信度函数算法和加入行为策略信度函数算法在重复覆盖栅格数、路径重复率、总航程等指标上存在较大差异。从表1可见未加入行为策略的路径规划的重复覆盖栅格有110块,而加入行为策略的路径规划只有33块,重复率减少了12%,路径重复率降低了3倍;总航程后者比前者少75步;陷入死区次数后者比前者也少11次。结果表明行为策略算法可以有效降低路径重复率,缩短航程,对于AUV来说路径规划更规整,更节省能源。而根据栅格性质直接对栅格赋值的信度函数算法和利用微分计算活性值的生物启发神经网络算法主要在时间上有着较大差异,前者时间较后者缩短了45%,结果表明

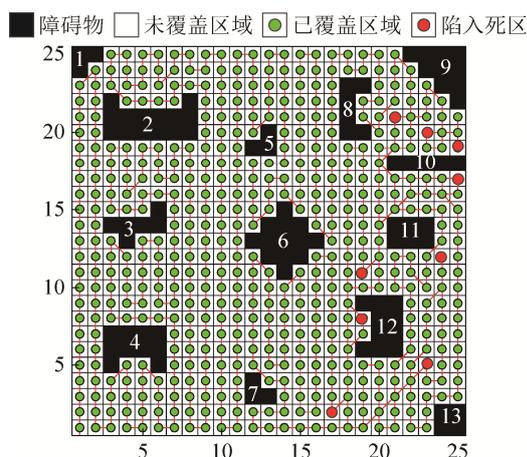
基于行为策略的信度函数算法实时性较高, 更有利于实际环境中的 AUV 全覆盖路径规划。



(a) 生物启发神经网络算法



(b) 未加入行为策略信度函数算法



(c) 加入行为策略信度函数算法

图 11 不同算法的全覆盖路径规划性能比较

Fig. 11 Performance comparison of complete coverage path planning with different algorithms

表 1 不同算法全覆盖路径规划性能比较

Tab. 1 Comparison of performance indexes of complete coverage path planning with different algorithms

算法指标	未加入行为策略 信度函数算法	加入行为策略 信度函数算法	生物启发神经网络算法
覆盖率/%	100	100	100
全覆盖 时间/s	41.29	34.28	61.22
步长/步	645	570	581
重复覆盖 区域/块	110	33	41
重复率/%	17.05	5.79	7.06
陷入死区 次数/次	19	8	9

### 3 结论

本文所提出的基于行为策略的全覆盖信度函数路径规划采用信度函数和行为策略相结合的方式解决了 AUV 二维和三维全覆盖路径规划问题。仿真实验证明本文所提算法的优越性, 其不仅能够实现工作区域的全覆盖, 而且降低了 AUV 路径的重复率, 提高了覆盖效率, 能够有效逃离死区, 减少了陷入死区的次数。

### 参考文献:

- [1] 简毅, 张月. 移动机器人全局覆盖路径规划算法研究进展与展望[J]. 计算机应用, 2014, 34(10): 2844-2849. Jian Yi, Zhang Yue. Complete coverage path planning algorithm for mobile robot: progress and prospect[J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(10): 2844-2849.
- [2] 杨勇. 基于混合算法的移动机器人路径规划研究[J]. 微处理机, 2015(1): 44-46. Yang Yong. Research on Path Planning of Mobile Robot Based on Hybrid Algorithm[J]. Microprocessors, 2015(1): 44-46.
- [3] Kapanoglu M, Alikalfa M, Ozkan M, et al. A pattern based genetic algorithm for multi-robot coverage path planning minimizing completion time[J]. Journal of Intelligent Manufacturing (S0956-5515), 2012, 23(4): 1035-1045.
- [4] Hofner C, Schmidt G. Path planning and guidance techniques for an autonomous mobile cleaning robot[J]. Robotics and Autonomous Systems (S0921-8890), 1995, 14(2): 199-212.
- [5] Schmidt G, Hofner C. An advanced planning and

- navigation approach for autonomous cleaning robot operation[C]// IEEE International Conference on Intelligent Robots System. Victoria, BC, Canada, 1998: 1230-1235.
- [6] Liu Y, Zhu S Q, Jin B, et al. Sensory navigation of autonomous cleaning robots[C]// Hangzhou: 5th World Conference on Intelligent Control Automation, 2004: 4793-4796.
- [7] De Carvalho R N, Vidal H A, Vieira P, et al. Complete coverage path planning and guidance for cleaning robots[C]// Portugal: IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1997: 677-682.
- [8] Ram A, Santamaria J C. Continuous case-based reasoning[J]. Artificial Intelligence (S0004-3702), 1997, 90(1/2): 25-77.
- [9] Arleo A, Smeraldi F, Gerstner W. Cognitive navigation based on non-uniform Gabor space sampling, unsupervised growing networks, and reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Neural Network (S1045-9227), 2004, 15(3): 639-652.
- [10] 李开生, 张慧慧, 费仁元, 等. 具有遍历特性的移动机器人规划方法的研究[J]. 机器人, 2001, 23(6): 486-492.  
Li Kaisheng, Zhang Huihui, Fei Renyuan, et al. Research on Path Planning of Mobile Robot with Covering-path Feature[J]. Robot, 2001, 23(6): 486-492.
- [11] 刘松, 李志蜀, 李奇. 机器人全覆盖最优路径规划的改进遗传算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(31): 245-248.  
Liu Song, Li Zhishu, Li Qi. Improved Genetic Algorithm Optimal Area Covering Path Planning for Family Robot[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(31): 245-248.
- [12] 邸业飞, 张崎. 基于矩形区域分解重组算法的吸尘路径规划[J]. 现代电子技术, 2011, 34(7): 147-149.  
Di Yefei, Zhang Qi. Vacuum Dust Absorption Path Planning Based on Rectangular Domain Decomposition and Restructuring Algorithm[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(7): 147-149.
- [13] Hyun M, Jeon H M, Jeong W Y, et al. Virtual Door-Based Coverage Path Planning for Mobile Robot[C]// IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Seoul Korea, 2009: 658-663.
- [14] Habib M A, Alan M S, Siddque N H. Optimizing coverage performance of multiple random path-planning robots[J]. Paladyn (S2080-9778), 2012, 3(1): 11-22.
- [15] Choset H. Coverage for robotics—a survey of recent results[J]. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence (S1012-2443), 2001, 31(1-4): 113-126.
- [16] Latombe J C. Robot motion planning[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [17] Choset H. Coverage of known spaces: the boustrophedon cellular decomposition[J]. Autonomous Robots (S0929-5593), 2000, 9(3): 247-253.
- [18] Tian C, Liu Y, Feng S, et al. Complete coverage algorithm of mobile robot—rectangular decomposition method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering (S1000-9345), 2005, 40(10): 56-61.
- [19] Garcia E, Gonzalez, Santos P. Mobile-robot navigation with complete coverage of unstructured environments[J]. Robotics and Autonomous Systems (S0921-8890), 2004, 46(4): 195-204.
- [20] Meng M, Yang X. A Neural Network Approach to Real-Time Trajectory Generation[C]// In IEEE Proc. Int. Conf. Robot. Autom at .Leuven, Belgium: IEEE, 1998: 1725-1730.
- [21] Zhu B, Wang Z M, Liu Z L. A Biological Inspired Neural Network Approach to Robot Path Planning in Unknown Environment[J]. Applied Mechanics and Materials (S1660-9336), 2014, 602-605: 1399-1402.
- [22] Yang X, Luo C M. A Neural Network Approach to Complete Coverage Path Planning[J]. Systems, Man, and Cybernetics (S2168-2216), 2004, 34(1): 718-725.
- [23] Zhu D Q, Li W C, Yan M Z, et al. The path planning of AUV based on D-S information fusion map building and bio-inspired neural network in unknown dynamic environment[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems (S1729-8814), 2014, 11(1): 1-14.
- [24] Zhu D Q, Sun B. The bio-inspired neural network based hybrid sliding-mode tracking control for open-frame underwater vehicles[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence (S0952-1976), 2013, 26(10): 2260-2269.
- [25] 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[J]. 控制与决策, 2015, 30(5): 798-806.  
Zhu Daqi, Sun Bing, Li Li. Algorithm for AUV's 3-D Path Planning and Safe Obstacle Avoidance based on Biological Inspired Model[J]. Control and Decision, 2015, 30(5): 798-806.