



## 改进RRT算法在未知三维环境下AUV目标搜索中的应用

李娟, 张韵, 陈涛

引用本文:

李娟,张韵,陈涛. 改进RRT算法在未知三维环境下AUV目标搜索中的应用[J]. 智能系统学报, 2022, 17(2): 368–375.

LI Juan,ZHANG Yun,CHEN Tao. Application of the improved RRT algorithm to AUV target search in an unknown 3D environment[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2022, 17(2): 368–375.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202105019>

## 您可能感兴趣的其他文章

### 融合改进A\*算法和Morphin算法的移动机器人动态路径规划

Mobile-robot dynamic path planning based on improved A\* and Morphin algorithms

智能系统学报. 2020, 15(3): 546–552 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201812023>

### 基于蚁群算法的四旋翼航迹规划

Four-rotor route planning based on the ant colony algorithm

智能系统学报. 2016, 11(2): 216–225 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201509009>

### 面向环境探测的多智能体自组织目标搜索算法

Self-organizing target search algorithm of multi-agent system for environment detection

智能系统学报. 2020, 15(2): 289–295 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201908023>

### 欠驱动AUV全局无抖振滑模轨迹跟踪控制

Global chattering-free sliding mode trajectory tracking control of underactuated autonomous underwater vehicles

智能系统学报. 2016, 11(2): 200–207 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201512015>

### 粗匹配和局部尺度压缩搜索下的快速ICP-SLAM

Fast ICP-SLAM with rough alignment and local scale-compressed searching

智能系统学报. 2017, 12(3): 413–421 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201605029>

### 基于改进粒子滤波的AUV海底地形辅助定位方法

Seabed terrain-aided positioning method based on improved particle filtering for AUVs

智能系统学报. 2020, 15(3): 553–559 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201903027>

微信公众平台



关注微信公众号，获取更多资讯信息

DOI: 10.11992/tis.202105019

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20211018.1929.004.html>

# 改进 RRT 算法在未知三维环境下 AUV 目标搜索中的应用

李娟<sup>1,2</sup>, 张韵<sup>2</sup>, 陈涛<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 海洋装置与控制技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学 智能科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对未知水下环境下的自主水下航行器 (autonomous underwater vehicle, AUV) 目标搜索问题, 传统方法搜索速度慢且以解决二维平面下搜索问题为主, 本文提出了一种基于改进 RRT (rapid-exploration random tree) 的未知三维环境目标搜索算法。在搜索方面, 分别建立了包括目标存在概率地图、不确定度地图、区域遍历度地图在内的实时地图并设定其更新规则, 根据搜索目标建立决策函数; 在局部规划方面, 将滚动规划与改进 RRT 算法相结合, 规划出到搜索决策点的路径。二者的结合, 实现了 AUV 在三维空间下在线实时搜索。仿真表明, 该算法具有较强的遍历能力, 提高了三维空间下目标搜索的速度。

**关键词:** 自主水下航行器; 目标搜索; 快速扩展随机树; 局部路径规划; 水下环境; 滚动规划; 实时搜索; 决策  
**中图分类号:** TP24    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1673-4785(2022)02-0368-08

中文引用格式: 李娟, 张韵, 陈涛. 改进 RRT 算法在未知三维环境下 AUV 目标搜索中的应用 [J]. 智能系统学报, 2022, 17(2): 368-375.

英文引用格式: LI Juan, ZHANG Yun, CHEN Tao. Application of the improved RRT algorithm to AUV target search in an unknown 3D environment[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2022, 17(2): 368-375.

## Application of the improved RRT algorithm to AUV target search in an unknown 3D environment

LI Juan<sup>1,2</sup>, ZHANG Yun<sup>2</sup>, CHEN Tao<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Ocean Installations and Control Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. School of Intelligent Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** To solve the target search problem of autonomous underwater vehicles (AUV) in an unknown underwater environment, traditional methods have slow search speed and mainly solve the search problem in a two-dimensional plane. In this study, an unknown three-dimensional (3D) environment target search algorithm based on the improved rapidly exploring random tree (RRT) algorithm is proposed. In the aspect of search, real-time maps, including target existence probability, uncertainty, and area traversal degree maps, are established, and their update rules are set. Moreover, the decision function is established according to the search target. In the aspect of local planning, the path to the search decision point is planned by combining rolling planning with the improved RRT algorithm. Their combination realizes the real-time online search of AUV in 3D space. The simulation shows that the algorithm has strong traversal capability and improves the target search speed in 3D space.

**Keywords:** autonomous underwater vehicles; target search; rapidly exploring random tree; local path planning; underwater environment; rolling planning; real-time search; decision-making

自主水下航行器 (autonomous underwater vehicle, AUV) 目标搜索是水下搜救、水下围捕等作业任务的重要组成部分。在未知的水下环境

中, AUV 无法预先获得目标和障碍物的信息。为了更好地完成水下任务, AUV 需具备自适应搜索与决策以及局部规划能力。

在搜索方面, Ma 等<sup>[1]</sup>提出一种针对未知环境目标搜索的组合选项和强化学习算法, 该算法通过在未知环境下的强化学习来处理实时任务, 提

收稿日期: 2021-05-13. 网络出版日期: 2021-10-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51809060, 5217110503); 黑龙江省自然科学基金项目 (E2017014).

通信作者: 陈涛. E-mail: [chentao\\_7777@163.com](mailto:chentao_7777@163.com).

高了动态特性。Dadgar等<sup>[2]</sup>为克服机器人工作空间的局限性,提出一种基于PSO的分布式算法,使基于PSO算法在全局机制下达到整体最优的目的。李娟等<sup>[3]</sup>针对水下搜索效率低,定位精度不稳定等问题,提出了一种基于动态预测的多AUV目标搜索方法,并将该方法分成了3种模式,最终通过仿真验证了其具有搜索高效性。倪建军等<sup>[4]</sup>针对未知的三维水下环境中的多AUV协同目标搜索问题,提出了一种改进的基于海豚群算法的方法,将搜索问题分为随机巡航、动态联盟和团队搜索3个阶段。综合已有研究成果,发现各个搜索算法都存在不足。文献[1]提出的学习算法很难适应完全未知环境,不能保证搜索的实时性和高效性;文献[2-3]所提出的算法不能很好地应用在三维环境中;文献[4]虽然提出了对三维环境的搜索方法,但整体搜索时间过长;文献[5]提出了水面航行器与水下航行器合作的目标搜索与打击方法,作者提出的方法更侧重在两种不同设备的合作搜索,针对搜索方法的创新没有详细描述;文献[6-7]分别从仿生算法角度对全局的路径规划提出优化方法。

与传统的路径规划方法相比,RRT (rapid-exploration random tree) 算法结构简单,具有随机性、环境建模简单等优势。文献[8-9]将双向快速随机搜索树算法与粒子群算法相结合,结合粒子群算法后,利用双向RRT算法得到的路径坐标作为粒子群算法的初始粒子,以不与障碍物发生碰撞为约束条件,对初始粒子进行优化,将处理后的路径作为最终路径,不仅具备了对未知空间的搜索能力且得到了较为平滑的路径。但基于此类算法研究,大都局限于二维平面内。

本文实现的目标是:在未知的三维环境中,保证AUV以可能短的时间搜索到尽可能多的目标。搜索过程中,对RRT算法进行改进,并结合滚动规划算法应用到三维目标搜索过程中。一方面,为提高搜索效率,建立搜索实时地图以及决策函数;另一方面,为解决RRT算法固有的盲目搜索以及不适用未知环境问题,提出反向节点裁剪规则同滚动规划相结合的算法。

## 1 模型及感知地图建立

### 1.1 问题描述

将三维任务搜索区域膨化为 $L_x \times L_y \times L_z$ 的长方体。对目标区域进行栅格化,将其均分为 $M \times N \times K$ 个大小为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的三维实际网格。将AUV的工作空间记为 $W_n$ ,其中 $n$ 为空间维数,

把AUV已经过的栅格记为1,未经过的栅格记为0。在任务区域随机分布着 $N_i$ 个静态目标、数量随机的球形障碍物,要求AUV在规定时间内,以较短时间找到区域中的所有目标。

### 1.2 目标模型

静态目标任意时刻都保持不变,故静态目标的模型可以描述为

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ y(k+1) \\ z(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \\ z(k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $x(k)$ 表示 $k$ 时刻静态目标横坐标值, $x(k+1)$ 表示 $k+1$ 时刻静态目标横坐标值; $y(k)$ 表示 $k$ 时刻静态目标纵坐标值, $y(k+1)$ 表示 $k+1$ 时刻静态目标纵坐标值; $z(k)$ 表示 $k$ 时刻静态目标竖坐标值, $z(k+1)$ 表示 $k+1$ 时刻静态目标竖坐标值。

### 1.3 声呐模型

本文引入文献[10]中的声呐模型,采用英国Tritech公司的Micron DST紧凑型数字成像声呐用于地图构建和信息探测。它能通过不断旋转变换能器,发送一个狭窄的扇形声束来扫描周围的环境。该声呐的工作频率为700 kHz,水平波束角和垂直波束角分别为 $30^\circ$ 和 $3^\circ$ ,能够实现一个完整的 $360^\circ$ 扇区扫描,最大范围可达100 m。

在本文中,对声呐进行简化。满足以下条件的目标可被AUV声呐探测到:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 \leq R^2 \quad (2)$$

式中: $(x_0, y_0, z_0)$ 假设为AUV的坐标; $(x, y, z)$ 是目标坐标; $R$ 为探测距离。

### 1.4 目标存在概率地图

目标存在概率地图<sup>[11]</sup>表示目标在实际网格图中存在的概率情况。由于AUV在未知环境中进行搜索,因此在搜索开始之前,AUV对整个任务区域内的目标位置、障碍物位置等信息一无所知,即 $P_a(0)=0.5$ 。

AUV的目标存在概率地图可以定义为

$$\text{MTPM}(k) = \{P_a(k) | a \in \Omega\} \quad (3)$$

式中: $P_a(k)$ 表示 $k$ 时刻网格 $a$ 中实际存在目标的概率, $0 \leq P_a(k) \leq 1$ 。 $P_a(k)=1$ 表示 $k$ 时刻AUV认为网格 $a$ 中存在目标、 $P_a(k)=0$ 表示在 $k$ 时刻AUV认为网格 $a$ 中不存在目标; $\Omega$ 是全局环境。

$k+1$ 时刻网格 $a$ 的目标存在概率更新公式如下:

$$P_{a,k+1} = \frac{P_d \cdot P_{a,k}}{P_d \cdot P_{a,k} + P_f \cdot (1 - P_{a,k})} \quad (4)$$

$$P_{a,k+1} = \frac{P_d \cdot P_{a,k}}{P_d \cdot P_{a,k} + (1 - P_f) \cdot (1 - P_{a,k})} \quad (5)$$

其中式(4)表示 $k$ 时刻网格 $a$ 存在目标的情况;式



(5)表示  $k$  时刻网格  $a$  不存在目标的情况。式中:  $P_d$  是检测概率, 表示传感器在真实存在目标的网格中发现目标的概率;  $P_f$  是虚警概率, 表示传感器在不存在真实目标的网格中检测到目标的概率。

为方便计算, 本文通过非线性变换将目标存在概率公式转变为线性形式:

$$Q_{a,k} = \ln\left(\frac{1}{P_a(k)} - 1\right) \quad (6)$$

### 1.5 不确定度地图

不确定度地图<sup>[11]</sup>反映 AUV 对目标搜索区域中网格的了解程度。网格的不确定度与目标存在概率相关。当网格的目标存在概率为 0.5 时, 不确定度为 1, 表示 AUV 对网格  $a$  的目标存在情况完全不了解。网格的目标存在概率与 0.5 相差越多, 网格的不确定度越低, 随着 AUV 对网格进行探访, 该网格的目标存在概率会增加或减少, AUV 对该网格中是否存在目标的判断也会随着探访次数的增加而越来越准确。

具体计算公式:

$$\mu_{a,k} = e^{-k \cdot |Q_{a,k}|} \quad (7)$$

式中:  $\mu_{a,k}$  代表  $k$  时刻网格  $a$  的不确定度;  $Q_{a,k}$  代表  $k$  时刻网格  $a$  的目标存在概率。

### 1.6 区域遍历度地图

为了了解整体搜索状况, 避免部分区域重复搜索, 建立遍历地图。  $k$  时刻网格  $a$  遍历状态可用  $B_a(k)$  表示:

$$B_a(k) = \begin{cases} 0, & d(k) \geq r \\ 0.5, & d(k) \rightarrow r \\ 1, & d(k) < r \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $d(k)$  为当前 AUV 距离预测决策点所在区域中心的距离;  $r$  表示区域的半径。

## 2 搜索决策函数

为提高搜索效率, AUV 目标搜索需满足以下要求:

- 1) 提高 AUV 对整体环境的了解程度;
- 2) 减少 AUV 对任务区域的重复搜索;
- 3) 减少 AUV 的反向搜索。

综合以上 3 个方面, 设计了搜索决策函数, 此描述了 AUV 执行搜索后的综合收益。该函数综合考虑了不确定度收益  $I_A(a,k)$ 、重复搜索收益  $I_B(a,k)$  以及转向收益  $I_C(a,k)$ 。AUV 通过搜索决策函数对 AUV 在下一时刻的位置进行搜索收益评估, 选取综合收益最大的网格作为下一步的搜索。

不确定度收益  $I_A(a,k)$  表示在  $k-1$  时刻, 以网格  $a$  为中心, 传感器探测范围为半径的探测区域

内的所有网格的不确定度的和。

重复搜索收益  $I_B(a,k)$  为在  $k-1$  时刻, 网格  $a$  传感器范围内的遍历度和。遍历度越高的区域, 说明该区域大体搜索情况已知, 应减少对该区域的重复搜索。

转向代价  $I_C(a,k)$  是取决于 AUV 下一步动作执行时的航向与当前的航向是否相同。

假设 AUV 在  $k-1$  时刻处于网格  $a$  中, 则 AUV 在  $k$  时刻可以向网格  $a$  的相邻网格移动。假设 AUV 在  $k$  时刻计划从网格  $a$  前往网格  $b$  (网格  $b$  是 AUV 目前所在网格  $a$  的相邻网格), 则搜索性能收益函数的具体公式如式 (9) 所示:

$$\text{INC}(a,k) = w_1 \cdot I_A(a,k) + w_2 \cdot I_B(a,k) + w_3 \cdot I_C(a,k) \quad (9)$$

式中:  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$  分别为不确定度、重复搜索、转向收益三部分的权重系数, 根据整个搜索状态的变化进行调整。

## 3 三维空间下目标搜索算法

### 3.1 搜索算法流程

在目标搜索过程中, 感知地图通过声呐探测情况进行更新, 并根据决策函数求出下一时刻搜索区域, 最后利用改进滚动 RRT 算法对搜索路径进行规划, 决策及规划过程反复进行, 直到发现所有目标。搜索算法伪代码如下:

```

start
Target probability()
Regional uncertainty()
Regional traversal()
p_goal=Decision function()
RRT algorithm(p_start,p_goal)
If all_goal() then
End if
If all_goal()<goal_number then
Return Target probability
End if
End

```

各函数解释如下: Target probability() 为目标存在概率更新; Regional uncertainty() 为区域不确定度更新; Regional traversal() 为区域遍历度更新; Decision function() 为目标决策函数, 决策出搜索点; RRT algorithm() 为规划局部路径; All\_goal() 为判断是否所有目标均被找到。

### 3.2 基本的三维 RRT 算法

三维环境下随机树扩展过程如图 1 所示。在二维的基础上, 增加了  $Z$  平面的搜索, 增加了搜索维度和计算的复杂度。

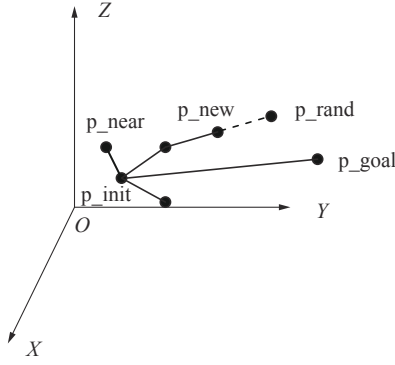


图 1 三维 RRT 扩展过程  
Fig. 1 3D RRT extend process

设  $O$  是 AUV 所处的水下状态空间,  $O \in W_n$ 。选择 AUV 的初始位置作为随机树的根节点  $p_{init}$ , 根节点作为父节点在空间中随机采样得到  $p_{rand}$ , 利用欧式距离在随机树上找距离  $p_{rand}$  最近的节点  $p_{near}$ , 然后  $p_{near}$  以  $r$  步长向  $p_{rand}$  扩展得到新节点  $p_{new}$ , 若  $p_{near}$  与  $p_{new}$  的连线通过了避碰检测, 则将新节点  $p_{new}$  以及连线加入到随机树上。对上述过程重复进行, 直到发现目标点。将随机树上的从根节点到目标点之间的树节点连接即为所规划的路径。

RRT 算法的伪代码如下:

RRT algorithm

$V = \{p_{init}\}$

for  $i=1$  to  $I$  do

$p_{rand} = \text{Random}()$

$p_{near} = \text{Nearest}(V, p_{rand})$

$p_{new} = \text{Extend}(p_{near}, r, p_{rand})$

if  $\text{Collision\_free}(p_{new}, p_{near})$  then

Grow\_tree( $V, p_{new}$ )

end if

if  $\|p_{new} - p_{goal}\| \leq d_{min}$  then

return  $V$

end if

end for

各函数解释如下:  $\text{Random}()$  为区域内随机选取一节点  $p_{rand}$ ;  $\text{Nearest}()$  为在随机树上寻找距离  $p_{rand}$  最近的节点  $p_{near}$ ;  $\text{Extend}()$  为从  $p_{near}$  向  $p_{rand}$  扩展步长  $r$ , 得到新节点  $p_{new}$ 。扩展关系式如下:

$$\begin{aligned} x_{new} &= x_{near} + r \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi \\ y_{new} &= y_{near} + r \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi \\ z_{new} &= z_{near} + r \cdot \cos\theta \end{aligned} \quad (10)$$

$\text{Collision\_free}()$  为若  $p_{new}$  与  $p_{near}$  之间存在障碍物, 重新选取节点。

从随机树的生长过程来看, 一方面节点的选取具有盲目性, 造成时间的延长, 搜索效率降低;

另一方面, RRT 算法通常作为全局规划使用, 不能直接应用到未知环境。为减少未知环境下的搜索时间以及提高搜索效率, 本文将对以上不足做出改进。

### 3.3 改进的三维 RRT 算法

#### 3.3.1 滚动规划

可以利用滚动规划解决三维水下环境复杂多变, 很难获取完整的全局信息的问题。滚动规划主要分为预测、优化、反馈 3 步。滚动过程中, 以探测到的环境信息为基础, 建立以 AUV 为中心的局部环境模型; 将环境模型看作规划窗口, 根据优化决策得到下一步的最优子目标点; 在前往子目标点的过程中, 根据探测到的新的环境信息, 补充校正原来的模型滚动后的局部路径规划<sup>[10]</sup>。

本文滚动窗口以探测设备模型为基础建立, 将探测环境窗口定义为滚动窗口, 滚动窗口模型如图 2 所示。

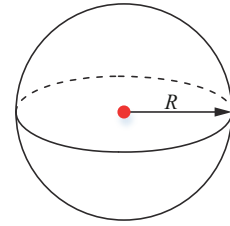


图 2 滚动窗口  
Fig. 2 Rolling window

#### 3.3.2 子目标点选取策略

记录  $t$  时刻航行器的所处位置为  $p_{init}(t)$ , 将航行器探测设备能够探测到的环境窗口定义为当前滚动规划窗口<sup>[12]</sup>。

不同情形下的子目标选取策略不同, 分别对以下 3 种情形进行讨论: 1) 目标在窗口内; 2) 窗口内不存在障碍物; 3) 窗口内存在障碍物。分别如图 3~5。

$$\begin{cases} d(p_{init}(t), p_{goal}(t)) \leq R \\ p_{temp}(t) = p_{goal}(t) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} d(p_{init}(t), p_{temp}(t)) = R \\ p_{temp}(t) = f(\min(d(p_{init}(t), p_{goal}(t)))) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} p_{new}(t) = \text{Extend}(p_{init}(t), r) \\ d(p_{new}(t), p_{temp}(t)) = R \\ p_{temp}(t) = f(\min(d(p_{new}(t), p_{goal}(t)))) \end{cases} \quad (13)$$

分别根据情况采用式 (11)~(13) 确定子目标点  $p_{temp}(t)$ <sup>[13]</sup>, 图 3~5 分别对应式 (11)~(13)。

#### 3.3.3 反向节点裁剪规则

为降低  $p_{rand}$  的随机性, 引入反向节点裁剪规则, 即控制  $(p_{init}, p_{new})$  向量同  $(p_{init}, p_{goal})$  向量间夹角为锐角, 避免反向选取节点。三维环境下, 为控制向量夹角, 分别从声呐水平

探测开角和纵深探测开角考虑,故将向量分别投影到  $xoy$  轴和  $yozy$  轴,得到投影角  $\mu_1$  和  $\mu_2$ ,如图6和图7所示。

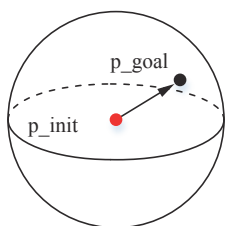


图3 目标在窗口内  
Fig. 3 Target in window

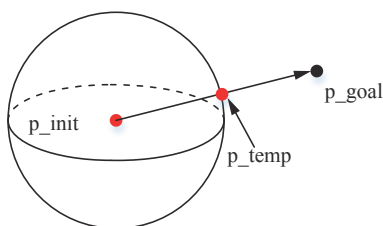


图4 窗口内不存在障碍物  
Fig. 4 No obstacles in the window

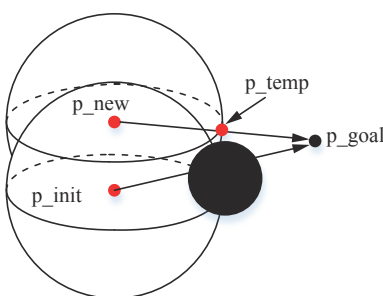


图5 窗口内存在障碍物  
Fig. 5 Obstacles in the window

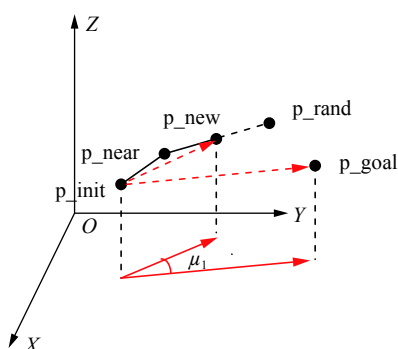


图6 XOY平面投影  
Fig. 6 Projected on the XOY plane

## 4 仿真结果及分析

### 4.1 改进滚动 RRT 算法

为验证引入滚动思想的三维 RRT 算法的有效性,设计了 RRT 算法与滚动 RRT 算法的对比仿真实验。仿真环境  $800\text{ m} \times 800\text{ m} \times 800\text{ m}$ , AUV

的探测半径为  $100\text{ m}$ , 起始点坐标为  $(0,0,0)$ , 目标点坐标为  $(750,750,750)$ , 随机树的扩展步长为  $80$ 。其中随机节点以及扩展树枝均为蓝色, 起点用红色标记, 目标点以及子目标点用绿色表示。灰色透明球体分别表示滚动窗口以及障碍物。如图8为 RRT 算法规划的过程, 红色实线为最终路径。图9和图10分别为改进滚动 RRT 算法规划过程的两个视角, 红色实线为最终路径。

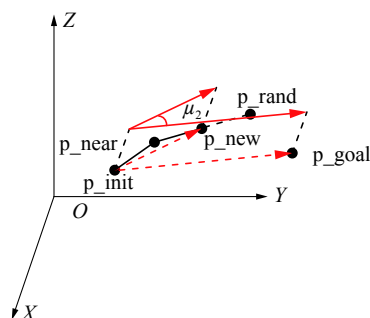


图7 YOZ平面投影  
Fig. 7 Projected on the YOZ plane

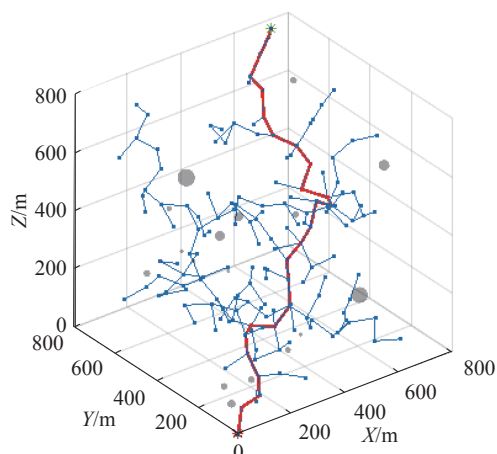


图8 RRT 算法  
Fig. 8 RRT algorithm

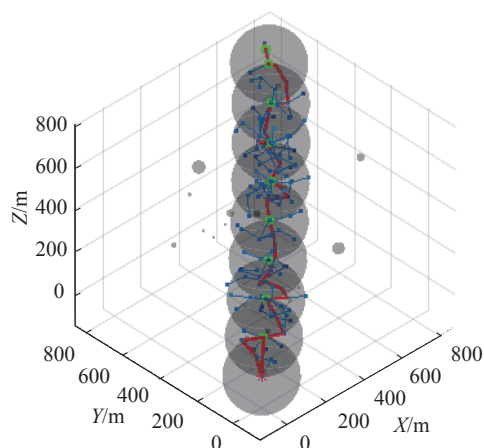


图9 改进滚动 RRT 算法 (角度1)  
Fig. 9 Improved rolling RRT algorithm(point 1)

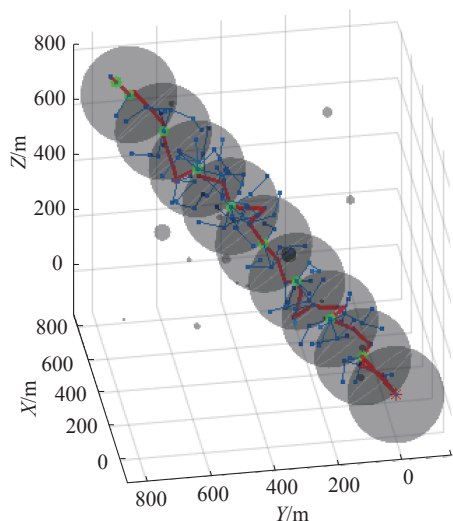


图10 改进滚动RRT算法(角度2)

Fig. 10 Improved rolling RRT algorithm(point 2)

选取20次实验中具有代表性的5组数据,对比两种算法的路径规划结果,从表1可以看到相对于传统RRT,引入滚动思想的RRT算法通过限制节点的选取范围以及树枝的长度大大减少了节点数量,缩短了规划时间,路径规划效率有了很大的提升。

表1 RRT同改进滚动RRT对比

Table 1 Comparison of RRT and Improved rolling RRT

算法	节点/个	路径/m
RRT	233	2800
	234	2093
	151	3018
	328	4416
	267	2517
改进滚动RRT	114	1897
	110	1812
	41	2282
	27	2485
	87	1688

#### 4.2 目标搜索仿真案例

本节仿真设置搜索区域实际大小为  $800\text{ m} \times 800\text{ m} \times 200\text{ m}$ , 声呐传感器的探测半径  $R$  为  $100\text{ m}$ , 检测概率  $P_d = 0.9$ , 虚警概率  $P_f = 0.1$ 。将搜索区域栅格化。仿真过程中将按障碍物的最大轮廓线膨化为球形,从而实现最大程度避碰,并将AUV和目标看作质点。

在AUV航行过程中,AUV航速设置为  $2\text{ m/s}$ 。本文采用步数为算法计量单位,考虑AUV的速度,设定AUV每航行  $2\text{ m}$  为一步,每步所用时间为  $1\text{ s}$ 。

AUV的初始坐标为  $(0,0,0)$ , 设置静目标11个,目标用五角星表示,球体障碍物7个,用黑色球体表示,如图11为搜索的初始状态。红色实线代表AUV的实时搜索路径。如图12为RRT算法目标搜索算法,红色实线为搜索路径。图13为改进滚动RRT目标搜索算法,红色实线为搜索路径。

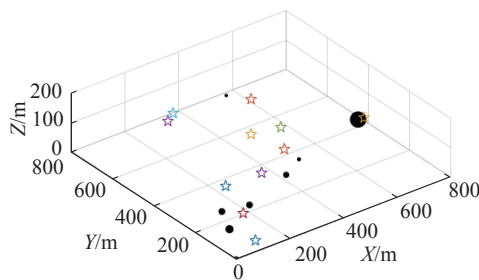


图11 初始状态

Fig. 11 Initial state

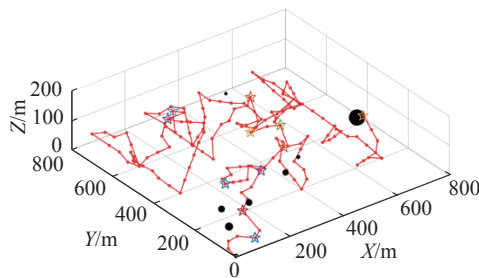


图12 RRT目标搜索算法

Fig. 12 Target search based on RRT algorithm

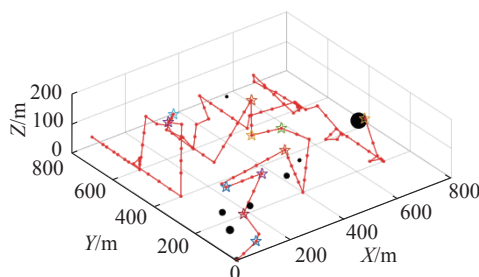


图13 改进滚动RRT目标搜索算法

Fig. 13 Target search based on improved rolling RRT algorithm

因为搜索决策函数一致,从图12和图13中看出,RRT目标搜索算法与滚动RRT搜索算法的搜索路径大致相同,但从表2中可以看出,应用滚动RRT算法的搜索时间明显少于RRT算法,搜索速度有了很大的提升。

表2 RRT搜索同改进滚动RRT搜索对比

Table 2 Comparison of RRT and improved rolling RRT

算法	时间/s	路径/m
RRT	30681	61367
改进滚动RRT	21987	43969



## 5 结束语

本文提出基于滚动 RRT 算法的三维目标搜索算法, 算法从决策点规划角度入手, 利用 RRT 算法快速性的特点提高整体环境的搜索速度。滚动规划结合子目标点选取策略, 将全局路径规划细分为一步步的局部路径规划, 使得 RRT 算法应用到未知环境; 其次, 利用搜索决策函数求出决策点后, 应用改进滚动 RRT 算法实时规划路径; 最后通过仿真验证了算法的高效性。另外, 多次仿真过程中, 出现了 AUV 对同一区域多次搜索并陷入当前搜索环境的情况, 避免区域重复搜索方面并没有很好的实现; 在决策点路径规划时, 多次出现规划时间过长的情况; 实际海底环境存在非常多的障碍物或是形状复杂的障碍物, 单纯利用文章中提出的改进算法, 可能会导致失败的情况发生, 因此要通过实际的水下试验来验证以及优化; 针对这三类问题仍有必要继续深入研究。

## 参考文献:

- [1] MA Lianbo, CHENG Shi, WANG Xingwei, et al. Co-operative two-engine multi-objective bee foraging algorithm with reinforcement learning[J]. *Knowledge-based systems*, 2017, 133: 278–293.
- [2] DADGAR M, JAFARI S, HAMZEH A. A PSO-based multi-robot cooperation method for target searching in unknown environments[J]. *Neurocomputing*, 2016, 177: 62–74.
- [3] 李娟, 张建新, 杨莉娟, 等. 未知环境下多自主水下航行器目标搜索方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(12): 1951–1957, 1972.  
LI Juan, ZHANG Jianxin, YANG Lijuan, et al. Target search of multiple autonomous underwater vehicles in an unknown environment[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2019, 40(12): 1951–1957, 1972.
- [4] NI Jianjun, YANG Liu, SHI Pengfei, et al. An improved DSA-based approach for multi-AUV cooperative search[J]. *Computational intelligence and neuroscience*, 2018, 2018: 2186574.
- [5] 吴宇, 苏析超, 崔佳鹏, 等. USV&AUV 水下目标协同搜索与打击航迹规划[J]. 控制与决策, 2021, 36(4): 825–834.  
WU Yu, SU Xichao, CUI Jiapeng, et al. Coordinated path planning of USV&AUV for an underwater target[J]. *Control and decision*, 2021, 36(4): 825–834.
- [6] 赵苗, 高永琪, 吴笛霄, 等. 复杂海战场环境下 AUV 全局路径规划方法[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(1): 41–48.  
ZHAO Miao, GAO Yongqi, WU Dixiao, et al. AUV global path planning method in complex sea battle field environment[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2021, 43(1): 41–48.
- [7] 徐炜翔, 朱志宇. 基于飞蛾火焰算法的 AUV 三维全局路径规划[J]. 上海理工大学学报, 2021, 43(2): 148–155.  
XU Weixiang, ZHU Zhiyu. Three-dimension global path planning for AUV based on moth-flame algorithm[J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2021, 43(2): 148–155.
- [8] 武晓晶, 许磊, 甄然, 等. 动态步长 BI-RRT 的无人机航迹规划算法[J]. 河北科技大学学报, 2019, 40(5): 414–422.  
WU Xiaojing, XU Lei, ZHEN Ran, et al. Dynamic step BI-RRT UAV path planning algorithm[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2019, 40(5): 414–422.
- [9] 陈志梅, 李敏, 邵雪卷, 等. 基于改进 RRT 算法的桥式起重机避障路径规划[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(8): 1832–1838.  
CHEN Zhimei, LI Min, SHAO Xuejuan, et al. Obstacle avoidance path planning of bridge crane based on improved RRT algorithm[J]. *Journal of system simulation*, 2021, 33(8): 1832–1838.
- [10] CAO Xiang, SUN Hongbing, JAN G E. Multi-AUV co-operative target search and tracking in unknown underwater environment[J]. *Ocean engineering*, 2018, 150: 1–11.
- [11] 刘重, 高晓光, 符小卫. 带信息回访机制的多无人机分布式协同目标搜索[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(9): 1998–2011.  
LIU Zhong, GAO Xiaoguang, FU Xiaowei. Multi-UAVs distributed cooperative target search algorithm with controllable revisit mechanism based on digital pheromone[J]. *Systems engineering and electronics*, 2017, 39(9): 1998–2011.
- [12] 张伟, 孙毅. 基于改进 RRT 算法的水下无人航行器路径规划方法[J]. 信息与电脑, 2020, 32(12): 74–77.  
ZHANG Wei, SUN Yi. Path planning method for AUV based on improved RRT algorithm[J]. *China computer & communication*, 2020, 32(12): 74–77.
- [13] 刘恩海, 高文斌, 孔瑞平, 等. 改进的 RRT 路径规划算法[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(8): 2253–2258.  
LIU Enhai, GAO Wenbin, KONG Ruiping, et al. Improved RRT path planning algorithm[J]. *Computer engineering and design*, 2019, 40(8): 2253–2258.

## 作者简介:

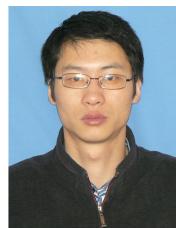


李娟, 教授, 博士, 主要研究方向为水下机器人、船舶智能控制和多智能体系统。获国防科技进步特等奖 1 项、一等奖 2 项、二等奖 1 项。获授权国家发明专利 7 项。出版学术著作 2 部, 发表学术论文 30 余篇。





张韵, 硕士研究生, 主要研究方向  
为水下机器人的智能规划与搜索。



陈涛, 教授, 主要研究方向为水下  
无人航行器控制。主持和参与国家自然  
科学基金2项、黑龙江省自然科学  
基金1项、装备预研及研制项目6项、  
获国防科技进步一等奖2项、国防科  
技进步特等奖1项, 国家科技进步二  
等奖1项。发表学术论文30余篇。

## 第十一届吴文俊人工智能科学技术奖颁奖盛典 暨 2021 中国人工智能产业年会

### 一、会议背景

“吴文俊人工智能科学技术奖”由中国人工智能学会发起主办,是我国智能科学技术领域唯一以人民科学家、人工智能开拓先驱、我国智能科学研究的开拓者和领军人、首届国家最高科学技术奖获得者、中国科学院院士、中国人工智能学会原名誉理事长吴文俊先生命名,依托社会力量设立的科学技术奖(国科奖社证字第0218号),具备提名推荐国家科学技术奖资格,被誉为“中国智能科学技术最高奖”。“吴文俊人工智能科学技术奖”旨在奖励在智能科学研究中取得重要发现,着力实现原始创新与突破,或在人工智能领域攻克关键“卡脖子”核心技术,推动智能科学技术进步取得重大进展,创造显著经济社会效益或者生态环境效益的单位或个人。迄今,“吴文俊人工智能科学技术奖”已成功召开十届评审及表彰活动,陈俊亮院士、吴澄院士、吴朝晖院士、张钹院士、陆汝钤院士、李德毅院士、潘云鹤院士、方滨兴院士、孙优贤院士和王海峰、杨强、周伯文、蒋田仔、焦李成、陈俊龙、田奇、胡德文等国内外院士、专家获得大奖,为大力弘扬科学家精神,激励创新人才不断涌现,抢占数字经济新高地 and 产业创新集群主阵地提供有力支撑,在我国智能科学技术领域享有较高盛誉。

近年来,新一轮科技革命和产业变革迅猛发展,数字技术、智能经济与数字化产业已成为催生新产业新业态和新模式的重点领域。加强关键核心的“卡脖子”技术攻关,抢占颠覆性商用技术制高点,强化国家战略科技力量,尽快实现高水平科技自立自强,推动构建具有国际竞争力的人工智能和数字化产业经济尤其重要。2021中国人工智能产业年会 China AI Industry's Annual Meeting(CAIIAM2021)由中国人工智能学会发起主办,作为吴文俊人工智能科学技术奖颁奖盛典的主题配套活动,大会集闭门研讨、荣誉表彰、项目签约、高端论坛、产品展示、报告发布等主要板块于一体,聚焦数字经济时代下产业创新集群发展,是国内权威性高、规模较大、品牌力强、行业影响深远的年度人工智能标志性颁奖盛会。

### 二、时间地点

2022年3月25日—27日(26日星期六上午为颁奖仪式)

中国北京、苏州工业园区

### 三、大会主题

创新赋能·科技自强

### 四、组织机构

#### (一)主办单位

中国人工智能学会

#### (二)协办单位

苏州工业园区管委会

#### (三)承办单位

中国人工智能学会吴文俊人工智能科学技术奖评选基地、智博天宫(苏州)人工智能产业研究院

### 五、联系方式

第十一届吴文俊人工智能科学技术奖颁奖盛典暨 2021 中国人工智能产业年会组委会

联系人: 陈老师、王老师、崔老师

联系电话: 010-82686687、18994413779、0512-62927535

电子邮箱: wwjkjj@caai.cn

wangqingyuan@caaipalace.com