

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.01.017

# 应用改进随机树算法的无人艇局部路径规划

庄佳园, 张 磊, 孙寒冰, 苏玉民

(哈尔滨工程大学 水下机器人技术重点实验室, 15000 哈尔滨)

**摘要:** 针对无人艇航速高及实时性要求高的特点, 为满足路径规划需要, 在经典快速扩展随机树(RRT)算法的基础上, 设计一种基于改进 RRT 算法的局部路径规划方法, 引入抑制因子、限定转角和距离启发信息, 改进生长点和探索点的选择, 提高了算法速度. 为兼顾航行距离最短和无人艇操控性能的特殊要求, 对规划路径采取多余航点处理以及考虑回转性能的平滑处理. 以海上和湖上典型雷达图像的处理结果为环境模型, 进行局部路径规划试验. 试验结果表明: 该方法可以快速完成路径搜索, 在提高搜索效率的同时缩短了规划距离, 优化处理后的航线更适用于无人艇的跟踪, 满足无人艇规划系统的要求.

**关键词:** 水面无人艇; RRT 算法; 雷达图像; 局部路径规划; 路径搜索

**中图分类号:** TP391

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0367-6234(2015)01-0112-06

## Improved rapidly-exploring random tree algorithm application in unmanned surface vehicle local path planning

ZHUANG Jiayuan, ZHANG Lei, SUN Hanbing, SU Yumin

(Science and Technology on Underwater Vehicle Laboratory, Harbin Engineering University, 150001 Harbin, China)

**Abstract:** A path planning method based on improved RRT (Rapidly-Exploring Random Tree) algorithm was proposed in application to local path planning of USV (Unmanned Surface Vehicle). Aiming at the high speed and real-time control of USV, the inhibitory factor, limited angle and distance heuristic information were introduced into classical RRT algorithm, thus the selection of exploration points and growing points were modified, and the speed of the algorithm was improved. The excess navigation points in planning path were processed and smoothed considering the gyration performance to make the navigation distance shorter and meet the special demands of maneuver performance of USV. The experiment of local path planning was completed based on the environment model constructed by the process results of typical radar images in the sea and lake experiments. The experimental results showed that the suggested algorithm could rapidly complete the path search, the efficient of algorithm was improved and the distance of path was reduced, the planning path after optimization treatment could satisfy the planning system need. The suggested method can apply to USV local path planning.

**Keywords:** USV (Unmanned Surface Vehicle); RRT algorithm; radar image; local path planning; path search

水面无人艇 (Unmanned Surface Vehicle, USV) 简称无人艇, 是一种具有自主规划、自主航行能力, 并可自主完成环境感知、目标探测及战术攻击等任务的小型水面船舶. 其中, 以色列

“Protector”和美国“Spartan”无人艇引领着当今世界无人艇的发展方向, 其他国家进行了无人艇的研究, 如意大利的“Charlie”<sup>[1]</sup>、英国的“Springer”<sup>[2]</sup>和葡萄牙的“Delfim”等. 文献[3-5]总结了 USV 的发展历史及现状. USV 的路径规划方法按对环境信息已知程度不同可分为两类: 环境信息完全已知的全局路径规划; 环境信息完全未知或部分未知, 通过传感器实时地对 USV 的当前工作环境进行探测, 以获取障碍物的位置和尺

**收稿日期:** 2013-10-25.

**基金项目:** 国家自然科学基金(51409054).

**作者简介:** 庄佳园(1984—), 男, 博士, 讲师;

苏玉民(1960—), 男, 教授, 博士生导师.

**通信作者:** 庄佳园, zhuangjiayuan@163.com.

寸等信息的局部路径规划<sup>[6]</sup>. 当 USV 按电子海图等已知环境信息规划的全局路径航行时, 同时需要根据航海雷达等当前传感器感知的局部环境进行动态局部路径规划<sup>[7]</sup>.

本文针对 USV 航速快、机动性强、对局部路径规划算法实时性要求高等特点, 改进了快速扩展随机树(RRT)算法, 以当前雷达图像为环境模型完成了 USV 动态局部路径规划, 通过对规划航线的优化处理, 在保证生成航线安全的同时, 使优化后航线相对航程最短且光顺可行.

## 1 路径规划算法的描述与实现

### 1.1 经典的 RRT 算法

快速扩展随机树 (rapidly-exploring random tree, RRT) 算法<sup>[8]</sup> 由 Lavelle 首次提出. 用树结构代替有向图结构, 可以在给定控制率的条件下, 解决高维多自由度机器人的复杂约束下的运动规划问题, 适用于包含几何和动力学约束的路径规划.

RRT 算法的主要思想是逐步、快速地降低一个随机选择的节点与树之间的距离, 直至满足预期要求. 目标是搜索到一条从起点  $x_{init}$  到终点  $x_{goal}$  的可行路径, 基本的 RRT 构建过程如图 1 所示.

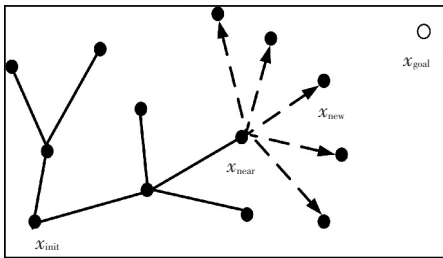


图 1 基本的 RRT 构建过程

在航海雷达图像范围内, 采用经典 RRT 算法分别扩展 100、500、1 000、2 000 步的效果见图 2.

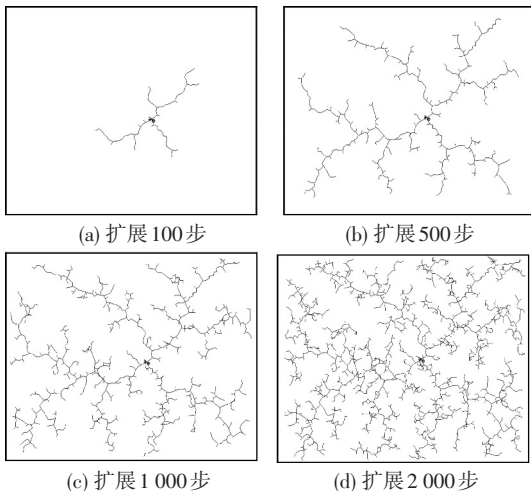


图 2 RRT 算法扩展过程

可以看出, RRT 算法每次扩展倾向于探索未

知部分, 主体枝干会迅速扩散到空间的 4 个顶点, 同时主干的分叉又会深入到其他局部区域, 这种平衡的扩展方式是 RRT 算法具有快速性的主要原因<sup>[9]</sup>.

### 1.2 RRT 算法的改进

RRT 算法在完成对未知环境探索并完成规划的同时, 存在以下问题<sup>[10]</sup>: 在全局空间内均匀搜索, 导致算法无谓耗费较大; 先全局搜索构建随机树, 然后一次性规划路径, 实时应用性较差; 路径的搜索树由随机采样点生成, 缺乏可重复性, 导致规划路径不是最优路径.

针对以上基本 RRT 算法存在的问题, 以提高算法的效率和性能为目标, 出现了一些 RRT 算法的改进算法. Nik 等<sup>[11]</sup> 将粒子滤波引入到 RRT 算法中, 提高了随机树扩展的自适应性. Aldahak 等<sup>[12]</sup> 提出了 KD 树概念, 提高了搜索效率. Yershova 等<sup>[13]</sup> 加入了扩展反馈信息用以抑制扩展点范围, Jaillet 等<sup>[14]</sup> 在此基础上增加了动态调整信息. Burns 等<sup>[15]</sup> 提出了以预测模型为基础的动态 RRT 算法, 减少了规划时间. 康亮等<sup>[16]</sup> 将 RRT 算法与基于滚动窗口的路径规划相结合, 以增强算法探索未知空间的能力. 宋金泽等<sup>[17]</sup> 将非完整约束条件与双向多步 RRT 算法相结合, 在提高搜索效率的同时保证了路径的可行性. 彭辉等<sup>[18]</sup> 在无人机区域目标搜索中改进了 RRT 算法, 提高了搜索效率.

综合以上优化算法, 针对 USV 的运动特点, 本文在两个方面改进 RRT 算法:

1) 改进生长点的选择, 限制陷入局部区域节点附近一定范围内的节点被选为生长点. 假设, 当前树  $T$  中含有  $n$  个节点,  $T = \{x_i\}, i = 1, 2, \dots, n$ . 以  $x_i$  为生长点, 对应的探索点  $x_{new}$  与障碍物发生碰撞, 称  $x_i$  探索失败; 若未与障碍物发生碰撞, 称  $x_i$  探索成功. 记  $f_i$  对节点  $x_i$  探索失败的次数, 即节点  $x_i$  探索失败一次, 则  $f_i = f_i + 1$ ; 如果该节点探索成功, 则重置  $f_i$  为 1. 探索失败节点  $x_i$  与其余节点  $x_j (x_j \in T)$  的距离为  $r_{ij} = x_j - x_i$ , 定义  $\delta_j$  为节点  $x_j$  的抑制因子:

$$\delta_j = \begin{cases} 1/f_j, & r_{ij} < \varepsilon; \\ r_{ij}/(f_j \cdot \varepsilon), & r_{ij} < f_j \cdot \varepsilon; \\ 1, & r_{ij} > f_j \cdot \varepsilon. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon$  为探索步长, 文中取 USV 在最大航速下的最小直航距离. 树中节点  $x_j$  与  $x_{rand}$  间的距离为  $D_j = x_j - x_{rand}$ , 则节点  $x_j$  的权值  $w_j$  为

$$w_j = \delta_j/D_j. \quad (2)$$

权值更新后, 选取树中权值最大的节点作为

树的生长点。

2)改进探索点的选择,以 USV 最大转角  $\theta_{max}$  为约束条件限制探索点的范围,引入距离启发信息,使得规划出来的航迹接近最优搜索航迹.在未搜索区域产生  $m$  个随机点  $x_{rand}^k, k=1,2,\dots,m$ ,以  $x_{rand}^k$  为目标点,分别按上述生长点改进方法计算探索点  $x_{temp}^k$ .为使规划后航迹满足 USV 的可航性约束,需要根据当前位置  $x_{near}^k$  和到  $x_{rand}^k$  的航向改变量  $\theta_k$ ,对于超出 USV 可达范围内的随机点  $x_{rand}^k$ ,以巡航速度下最大转角  $\theta_{max}$  为限制条件来计算  $x_{temp}^k$ :

$$x_{temp}^k = \begin{cases} x_{rand}^k, & x_{rand}^k - x_{near}^k \leq \varepsilon, \theta_k \leq \theta_{max}; \\ (x_{rand}^k - x_{near}^k) \cdot \theta_{max}, & x_{rand}^k - x_{near}^k < \varepsilon, \theta_k > \theta_{max}; \\ x_{near}^k + \varepsilon \cdot \theta_k, & x_{rand}^k - x_{near}^k > \varepsilon; \theta_k < \theta_{max}; \\ x_{near}^k + \varepsilon \cdot \theta_{max}, & x_{rand}^k - x_{near}^k > \varepsilon, \theta_k > \theta_{max}. \end{cases} \quad (3)$$

以当前探索点  $x_{temp}^k$  距目标的距离为启发信息,计算每个探索点  $x_{temp}^k$  到目标点的直线距离  $J_k$ :

$$J_k = x_{temp}^k - x_{goal}. \quad (4)$$

选择距离目标点最近的探索点  $x_{temp}^k$  为最优节点加入生长树.扩展过程如图 3 所示.

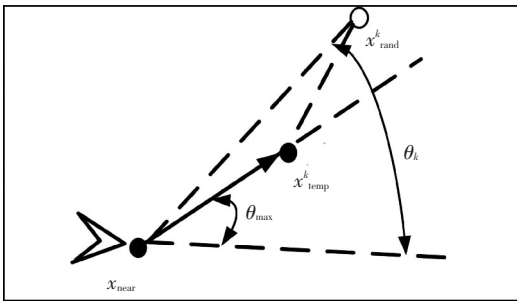


图 3 改进的 RRT 节点扩展

根据上述策略,基于改进 RRT 算法的局部路径规划算法描述如图 4 所示:

**步骤 1** 初始化生长树  $T$ ,以初始点  $x_{init}$  为生长树的根节点  $x_1$ ;

**步骤 2** 在未搜索区域产生  $m$  个随机点  $x_{rand}^k, k=1,2,\dots,m$ ,作为树的探索方向点;

**步骤 3** 对每个随机点  $x_{rand}^k$ ,选择树的生长点  $x_{near}^k$ .假定当前树  $T$  中有  $n$  个节点,  $T = \{x_i\}, i=1,2,\dots,n$ ,按式(1)、(2)计算权值  $w_j$ ,选择  $w_j$  最大的树中节点为生长点  $x_{near}^k$ ;

**步骤 4** 计算探索点  $x_{temp}^k$ ,以 USV 最大转角  $\theta_{max}$  为限制条件,按式(3)计算  $x_{temp}^k$ ;

**步骤 5** 选择最优节点  $x_{new}$ ,按式(4)计算  $J_k$ ,选择  $\min\{J_k\}$  对应的探索点  $x_{temp}^k$  为最优节点加

入生长树;

**步骤 6** 更新生长树  $T$ ,若  $x_{new}$  未与任何障碍物发生碰撞,则  $x_{new}$  加入生长树  $T$  中,新的生长树更新为  $T = T + x_{new}$ ,否则放弃  $x_{new}$ ,  $T$  不变,返回步骤 2;

**步骤 7** 判断是否到达目标点  $x_{goal}$ ,如果  $x_{goal} - x_{new} < \tau$  ( $\tau$  为目标点的范围阈值),则认为到达目标点  $x_{goal}$ ,否则返回步骤 2;

**步骤 8** 从目标点  $x_{goal}$  回溯到初始点  $x_{init}$ ,返回路径.

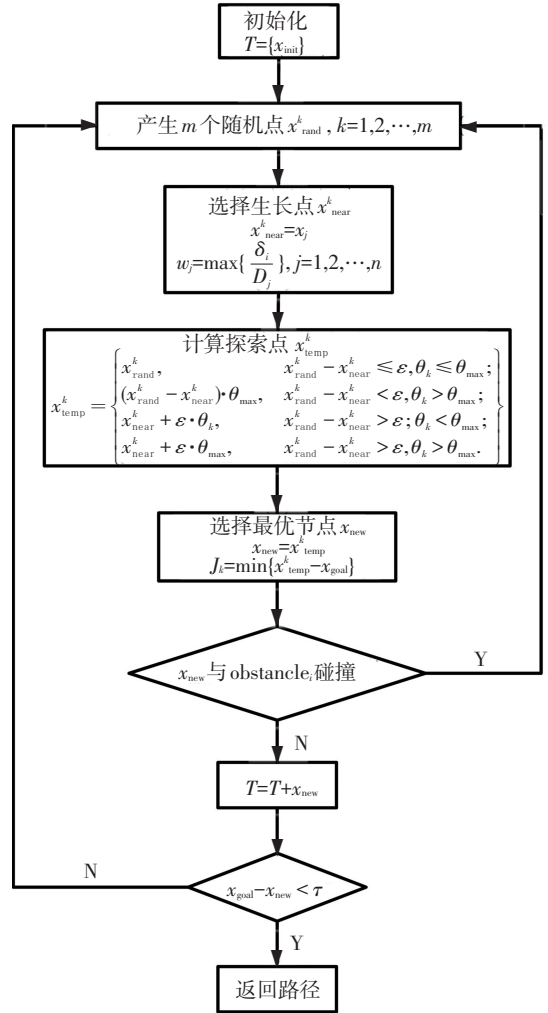


图 4 改进 RRT 算法流程图

由以上算法过程和图 4 可以看出:通过对 RRT 算法生长点选取的改进,在选取生长点时不仅考虑随机方向点和树节点之间的距离,同时加入衡量节点探索失败次数的抑制因子,实现自适应调整树中节点的生长权值,使树朝着最有利的方向生长;通过对探索点选取的改进,以最大转角限制探索方向,使规划航迹趋于实用,以距目标点的距离为启发因子,削弱新增节点的随机性,使得规划航迹接近最优航迹.

## 2 试验结果及分析

2010 年~2012 年,某型 USV 在中国进行了多次外场试验,完成了自主航行和无人自主避碰试

验,试验结果验证了本文算法的有效性.

选取 3 种自主避碰试验中的典型实际雷达图像,如图 5 所示.

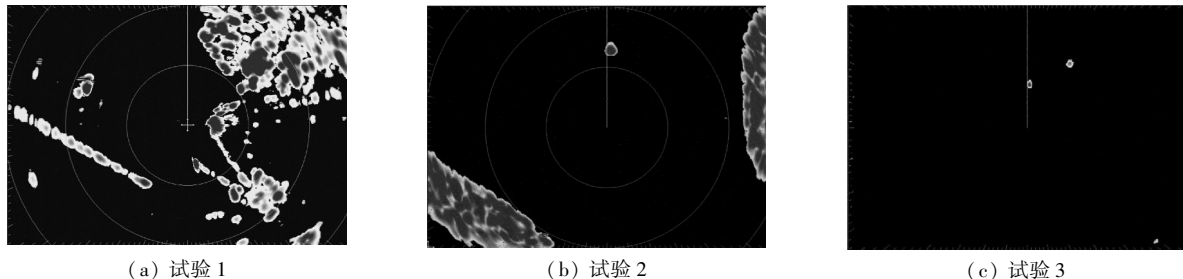


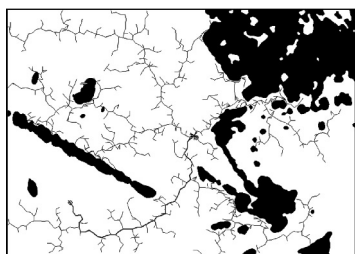
图 5 原始雷达图像

**试验 1** 港口内自主出港试验,起始点为 USV 当前位置,目标点为港口外一点.

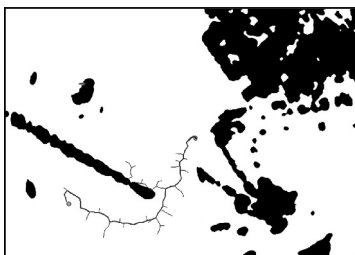
**试验 2** 湖泊内一个障碍物规避试验,起始点为 USV 当前位置,目标点为障碍物后一点.

**试验 3** 海上两个障碍物规避试验,起始点为 USV 当前位置,目标点为右前方两个障碍物中间一点.

为验证改进 RRT 算法有效性,以经过处理的二值化雷达图像为环境模型<sup>[19]</sup>,采用经典 RRT 算法和本文改进算法进行航迹搜索,USV 航速 20 节(搜索步长为 10 m),最大转弯角为 60°,试验结果如图 6~8 所示.



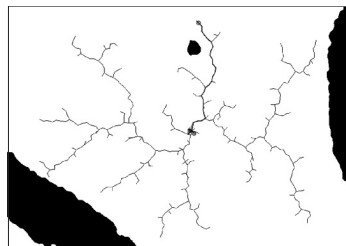
(a) 经典 RRT 算法



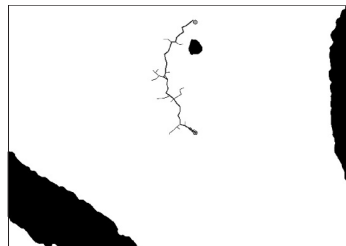
(b) 改进 RRT 算法

图 6 试验 1 规划航线

表 1 可以看出,经典 RRT 算法和改进 RRT 算法均可以生成一条由起始点到目标点的安全航线,通过对该航线中航点的跟踪,即可使 USV 达到自主航行和避碰的目的.但从搜索效率来看,改进 RRT 算法对规划路径的搜索方向性更明确,树中的无用节点大幅减少,同时对陷入局部区域中的节点具有较好的限制.如试验 1 中在第一次搜

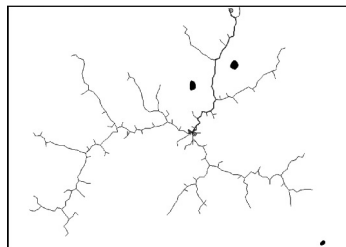


(a) 经典 RRT 算法

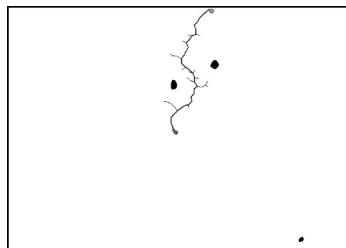


(b) 改进 RRT 算法

图 7 试验 2 规划航线



(a) 经典 RRT 算法



(b) 改进 RRT 算法

图 8 试验 3 规划航线

索不成功的情况下,能快速调整生长点并完成路

径搜索.从规划时间来看,由于经典 RRT 算法在整个模型空间内均匀搜索可行路线,因此搜索节点较多,规划时间较长,不能满足 USV 的实时性要求.综上,本文对探索点和生长点的选择的改进,可以提高算法的效率,满足 USV 嵌入式系统的实时性要求.

表 1 3 种试验规划结果比较

试验编号	树中节点数		规划时间/s	
	经典 RRT	改进 RRT	经典 RRT	改进 RRT
1	1 017	125	0.678	0.123
2	403	97	0.564	0.109
3	368	73	0.532	0.112

### 3 规划路径的优化处理

文中提出的改进 RRT 算法虽然可以完成可行路径的搜索,但规划航线中都存在多余航点,使得规划出来的路径并不理想.多余航点是指那些去除后不会影响航线有效性和安全性的航点.如果将规划结果直接作为 USV 航行路径,多余航点造成的阶梯形和锯齿形线段不利于 USV 的运动控制,因此需要对规划路径进行优化处理,仅保留转向点,以适应 USV 的实际航行路线.本文采用二分查找法逐次判定线段安全性,对航点序列进行多余航点去除,过程如下<sup>[20]</sup>:在规划出的路径中依次取出连续的航点  $p_i, p_{i+1}, p_{i+2}$ ,若  $p_i$  与  $p_{i+2}$  之间的连线不与障碍物发生碰撞,则去除  $p_{i+1}$ ;继续判断  $p_i$  与  $p_{i+2}$  之后的航点连线,若其连线不与障碍物发生碰撞,则删去  $p_{i+2}$ ;依次类推,直到  $p_i$  与后面的某航点的连接线与障碍物发生碰撞,则在该航点后重新取出连续的 3 个航点并作为  $p_i, p_{i+1}, p_{i+2}$ ;重复上述过程,直至取完全部航点.

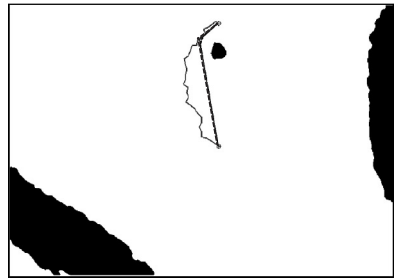
称经过多余航点去除后的规划路径为关键路径.由于仅保留了少量必要航点(关键点),使得关键路径上存在许多拐角,USV 到达关键路径上关键点时要保持一定的速度,但在该关键点处艏向角要发生变化.由于 USV 在航行过程中惯性较大,经常会冲出关键点,艏向控制也需要一定的时间达到稳定,会造成 USV 偏离原规划航线,对运动控制尤其是航迹跟踪有不利影响,因此需要对关键路径的拐点进行平滑处理.本文采用的处理方式是基于试验数据的曲线拟合,在分析总结 USV 大量回转试验数据的基础上,统计 USV 在不同航速下的战术回转直径,以每个拐点处的转艏角度对应的圆弧代替原路径中的拐点,达到对规划路径进行平滑处理的目的,使处理后的航行路

径更接近于实际航行情况.本文以运动控制限定的最大舵角( $10^\circ$ )对应的回转试验数据作为拟合曲线.

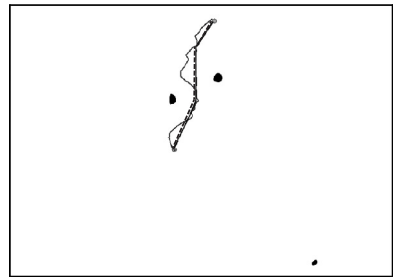
经过优化处理后的规划航线见图 9,优化前后结果比较见表 2.



(a) 试验 1 规划航线



(b) 试验 2 规划航线



(c) 试验 3 规划航线

注:曲线为优化前规划航线,实线为去除多余航点后的航线,虚线为平滑后的航线.

图 9 优化后规划航线

表 2 优化前后规划结果比较

试验编号	航点数		规划距离/m	
	优化前	优化后	优化前	优化后
1	54	3	911.71	644.99
2	28	3	499.30	431.76
3	33	4	575.63	499.84

由表 2 可以看出:本文采用的优化方法可以有效地去除原规划路径中多余的航点,减少规划后的航行距离;以 USV 实际回转试验数据光顺处理后的路径更加容易满足 USV 运动控制系统要求,具有可跟踪性.

## 4 结 论

1) 改进了经典 RRT 算法探索点和生长点的选择方式, 在保证树生长方向有利的同时削弱新增节点的随机性, 使其更适用于 USV 的局部路径规划。

2) 以海上和湖上实际雷达图像为环境模型, 完成了局部路径规划试验, 并与经典 RRT 算法进行对比。本文的改进方法可以较好地提高搜索效率, 同时对陷入局部区域的节点有一定的抑制作用。

3) 通过对规划航线的优化和基于回转试验数据的平滑处理, 去除了规划路径中的多余航点, 减少了规划距离, 同时光滑后的路径可更好地适应 USV 控制系统的要求。

## 参考文献

- [1] CACCIA M, BIBULI M, BONO R, et al. Basic navigation, guidance and control of an unmanned surface vehicle [J]. *Autonomous Robots*, 2008, 25 (4): 349-365.
- [2] XU T, CHUDLEY J, SUTTON R. Soft computing design of a multisensory data fusion system for unmanned surface vehicle navigation [C]//*Proceedings of the 7th IFAC Conference on Maneuvering and Control of Marine Craft*. Lisbon: IFAC, 2006: 124-156.
- [3] YAN Rujian, PANG Shuo, SUN Hanbing, et al. Development and missions of unmanned surface vehicle [J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2010, 9 (4): 451-457.
- [4] MANLEY J E. Autonomous surface vessels, 15 years of development [C]//*Proceedings of Oceans 2008 MTS/IEEE Quebec Conference and Exhibition*. Quebec: IEEE, 2008: 1-4.
- [5] VEERS J, BERTRAM V. Development of the USV multi-mission surface vehicle III [C]//*Proceedings of 5th Int Conference Computer and IT Application in the Maritime Industries (COMPIT)*. Leiden: COMPIT, 2006: 345-355.
- [6] 马仁利, 关正西. 路径规划技术的现状与发展综述 [J]. *现代机械*, 2008 (3): 22-27.
- [7] CAMPBELL S, NAEEM W, IRWIN G W. A review on improving the autonomy of unmanned surface vehicles through intelligent collision avoidance manoeuvres [J]. *Annual Reviews in Control*, 2012, 36(9): 167-283.
- [8] LAVALLE S. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning [D]. Iowa: Iowa State University, 1998.
- [9] 王维. 虚拟人运动规划与运动合成关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2011.
- [10] 康亮. 自主移动机器人运动规划的若干算法研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [11] NIK A M, REID S. Particle RRT for path planning with uncertainty [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Rome: IEEE, 2007: 1617-1624.
- [12] ALDAHAK A, ELNAGAR A. Practical pursuit-evasion algorithm: detection and tracking [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Rome: IEEE, 2007: 343-348.
- [13] YERSHOVA A, JAILLET L, SIMÉON T, et al. Dynamic domain RRTs: Efficient exploration by controlling the sampling domain [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona: IEEE, 2005: 3856-3861.
- [14] JAILLET L, YERSHOVA A, LAVALLE S, et al. Adaptive tuning of the sampling domain for dynamic-domain RRTs [C]//*Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Edmonton: IEEE, 2005: 2851-2856.
- [15] BURNS B, BROCK O. Single-query motion planning with utility guided random trees [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Rome: IEEE, 2007: 3307-3312.
- [16] 康亮, 赵春霞, 郭剑辉. 基于模糊滚动 RRT 算法的移动机器人路径规划 [J]. *南京理工大学学报: 自然科学版*, 2010, 34(5): 642-648
- [17] 宋金泽, 戴斌, 单恩忠, 等. 一种改进的 RRT 路径规划算法 [J]. *电子学报*, 2010, 32(2): 225-228.
- [18] 彭辉, 王林, 沈林成. 区域目标搜索中基于改进 RRT 的 UAV 实时航迹规划 [J]. *国防科技大学学报*, 2009, 31(5): 86-91.
- [19] 庄佳园, 徐玉如, 万磊, 等. 基于雷达图像的水面无人艇目标检测技术 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2012, 33(2): 29-135.
- [20] 庄佳园, 苏玉民, 廖煜雷, 等. 基于航海雷达的水面无人艇局部路径规划 [J]. *上海交通大学学报*, 2012, 46(9): 1371-1375.

(编辑 杨 波)