

操纵性约束下的无人艇区域覆盖路径规划

王卓, 曹璐, 戚战锋

(中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北宜昌 443003)

摘要 随着日益增长的水域开发需求, 区域覆盖是无人艇面向应用的重要能力。然而, 经典的平行线扫描路径规划在转弯处期望艏向角不连续, 无人艇路径跟踪误差大, 单位航程区域覆盖率低。为此, 基于无人艇操纵性约束, 提出平行线扫描路径规划方法。该方法根据扫海宽度与无人艇定常回转直径大小关系, 结合无人艇艏向角连续约束, 着重对回转段进行路径规划。经仿真验证, 该方法可实现对任意扫海宽度与无人艇回转直径进行区域覆盖路径规划。相比经典平行线扫描路径规划, 该方法提高了无人艇单位航程区域覆盖率, 提升了无人艇路径跟踪效果。

关键词 无人艇; 路径规划; 区域覆盖; 操纵性; 平行线扫描

中图分类号 TP 242

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2022)02-0143-08

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.02.009

Area Coverage Path Planning of Unmanned Surface Vehicle under Maneuverability Constraints

WANG Zhuo, CAO Lu, QI Zhanfeng

(No. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China)

Abstract With the increasing demand for water resources exploration, area coverage is an important capability for unmanned surface vehicles (USVs) to enable mission-oriented applications. However, the desired heading angle at the turning path is generally discontinuous for the classical parallel line-scanning path planning method. In such a case, the tracking error of USVs is large, which would cause low efficiency of area coverage. In view of this problem, this paper presents a parallel line-scanning path planning based on maneuverability. According to the size relation between the scanning width and the turning diameter and considering the constraint of continuous heading angle, our path planning method emphasizes on the path planning of turning path. Verified by the simulation test, our path planning method could generate a smooth area coverage path planning on any scanning width and USV turning diameter. Compared with the classical parallel line-scanning path planning method, our path planning method has increased the USV's efficiency in area coverage per voyage and path tracking.

Key words unmanned surface vehicle; path planning; area coverage; maneuverability; parallel line-scanning

0 引言

随着对水域开发需求的提高, 无人艇被广泛应用在水面搜寻及水底地形测绘等应用场景。区域覆

盖研究是无人艇应用的一个重要研究方向: 一方面需要满足较高的区域覆盖率, 另一方面需要满足无人艇的操纵性^[1]。区域覆盖研究可分为离线算法与启发式算法^[2], 其中离线算法包括平行线扫描算法^[3]

收稿日期: 2022-11-29

作者简介: 王卓 (1994-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事无人艇路径规划、运动控制研究。

基金项目: 中国船舶集团科技创新与研发项目“海上多平台无人系统自主/协同技术研究”(201808K)。

(或牛耕法),内螺旋线算法等。基于平行线扫描算法的区域覆盖路径规划称为平行线扫描路径规划,因其路径简单、转弯较少,在无人系统区域覆盖任务中被广泛采用^[4]。

万等人^[5]根据无人机最小转弯半径,提出无人机区域覆盖中的转弯路径规划方法,缩短转弯路径的距离。Berger 等人^[6]根据传感器扫视宽度与边界关系,提出无人机平行线扫描路径规划中转弯航点的确定方法。Coombes 等人^[7]利用直线与圆弧设计无人机转弯路径,减少转弯过程中的时间消耗。Broderick 等人^[8]利用平行线扫描路径规划完成有障碍物区域完全覆盖,设计无人车转弯路径,使能量消耗最小。上述无人系统为减少平行线扫描路径规划转弯部分的距离与时间消耗,考虑转弯半径与传感器扫视宽度的影响,优化了直角转弯路径。

Du 等人^[9]考虑无人艇艏向角连续,利用有限种类圆弧,完成无人艇两点之间的路径规划。Kratzke 等人^[10]建立海上搜救路径规划系统,通过平行线扫描路径规划,完成海上区域搜寻任务。Manda 等人^[11]提出了一种深度自适应水文测绘方法,利用平行线扫描路径规划,调整转弯路径点供无人艇调整艏向,完全覆盖测绘区域。苗等人^[12]利用无人艇遍历海湾,通过平行线扫描路径规划完成覆盖。Espensen 等人^[13]利用无人艇扫描海床,通过平行线扫描路径规划完全覆盖。

相比无人机与无人车平行线扫描研究,无人艇平行线扫描路径规划更关注区域覆盖率,尚未有同时考虑无人艇艏向角连续和扫海宽度^[14]与回转直径大小关系的报道。作为欠驱动移动机器人,无人艇跟随阶梯变化的期望艏向角时,无人艇路径跟踪误差大。然而,无人艇航行距离有限,当路径跟踪误差增大后,无人艇航程增长,无人艇回转过程中的额外能耗增多,这将降低区域覆盖任务完成效率,甚至导致区域覆盖任务失败。

本文针对上述问题,以无人艇操纵性为约束,提出无人艇平行线扫描改进方法,并通过仿真验证了该方法相比平行线扫描经典方法的优越性。可实现任意无人艇回转直径完成区域覆盖,且可根据不同探测设备对应的扫海宽度调整区域覆盖转弯路径。

1 问题描述

平行线扫描路径规划是区域探测、海上搜救、区域海洋环境监测等应用所采取的典型路径规划策略,通常以矩形区域作为搜寻区域^[15]。该方法为:首先,遍历搜寻区域的边长信息,以最大宽度对应边作为无人艇航行的主方向,保证无人艇往复搜寻回转次数最少^[16];其次,根据最大宽度与扫海宽度,确定平行线数量;最后,在搜寻区域内,确定距离边界为单位扫海宽度的平行线的首尾端点,用线段以此串联平行线的首尾端点,完成全覆盖的区域路径规划。

如图 1 所示,以无人艇一次回转过程为例,其路径可拆分为平行线段(SA, BG)与回转段(AB),路径期望艏向角呈阶梯式变化(90°→0°→-90°)。

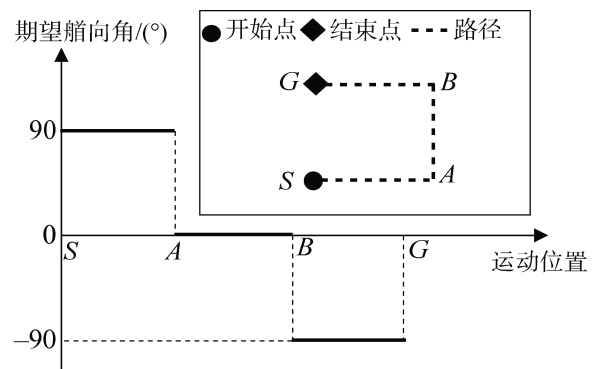


图 1 路径规划回转过程期望艏向角变化

Fig. 1 Desired heading angle curve during turning in path planning

以常规欠驱动无人艇为例,受操纵性限制,无人艇难以实现直角回转,而是以某一回转直径作圆弧运动,且艏向角连续变化。一方面,无人艇艏向角难以跟随阶梯变化的期望艏向角,从而无法有效跟踪回转段路径,也就无法达到预期的区域覆盖效果;另一方面,需考虑扫海宽度的影响,回转段路径因扫海宽度与回转直径大小关系而有半圆形、半跑道形和多段圆弧等不同形式。

为了解决路径期望艏向角不连续和考虑扫海宽度与回转直径大小关系的路径规划问题,以无人艇操纵性作为约束,提出无人艇平行线扫描改进方法。首先,根据扫海宽度与无人艇回转直径大小关

系, 结合无人艇操纵性约束, 着重对回转段进行运动分析与规划。然后, 对整个矩形区域进行路径规划, 实现区域覆盖。

2 回转段运动分析

本研究中, 传感器检测单元中心位于无人艇重心, 其可探测区域为以无人艇重心为圆心, 扫海宽度为半径的圆形区域。基于此特征, 研究无人艇回转阶段的路径规划。

另, 无人艇运动为“空气-水”二相流运动, 运动情况复杂, 为简化问题, 作如下假设:

假设 1: 不考虑风浪流干扰。

假设 2: 保持无人艇在航行过程中速度恒定。

在平行线扫描路径规划中, 相邻平行线之间的距离, 称为搜寻间距, 为减少区域覆盖重复率, 取搜寻间距等于扫海宽度。故, 无人艇回转段路径规划可分为扫海宽度等于、大于和小于无人艇回转直径 3 种情形, 如图 2 所示。图 2 中: d 为无人艇最小定常回转直径, w 为搜寻间距, s 为扫海宽度, O_1 和 O_2 是无人艇定常回转圈的圆心, S 、 G 分别为路径起点与终点, A 、 B 分别为回转段开始点与结束点, C 、 D 、 E 均为无人艇回转圈上的点。

假设无人艇初始时刻向正东方向航行, 艏向角为 90° , 逆时针回转, 则图 2 中 3 种情形的期望艏向角变化如图 3 所示。

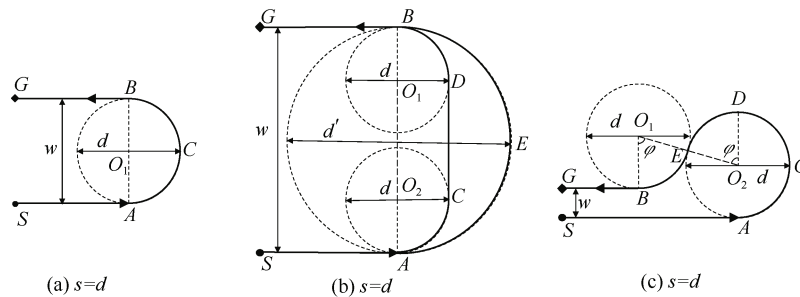


图 2 扫海宽度与最小回转直径的大小关系

Fig. 2 Size relation between scanning width and minimum turning diameter

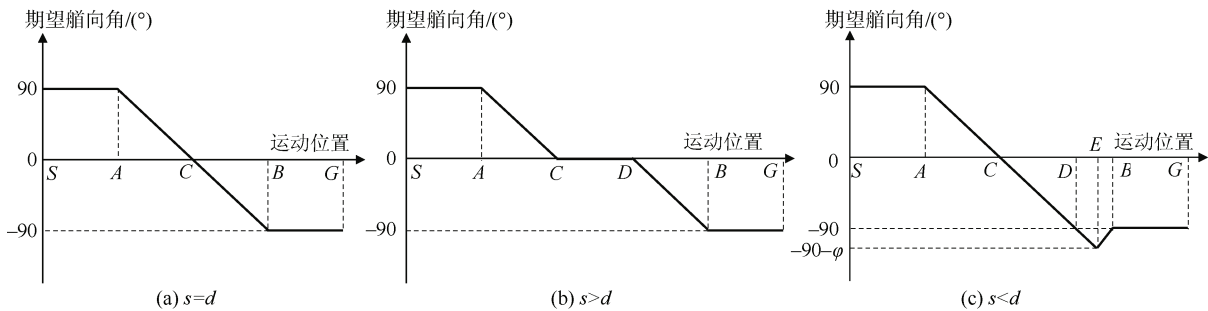


图 3 回转过程期望艏向角变化

Fig. 3 Desired heading angle curve during turning

当 $s = d$ 时, 如图 2 (a), 以 d 为直径的半圆作为无人艇回转段的路径, 其期望艏向角以固定斜率从 90° 变化至 -90° , 如图 3 (a) 所示。

当 $s > d$ 时, 如图 2 (b), 无人艇从 A 点运动至 B 点, 可分 2 种规划路径: 一种是以变化舵角沿 $ACDB$ 运动; 另一种是以固定舵角沿 AEB 运动, 这 2 种路径均能满足无人艇艏向角连续。

对比 $ACDB$ 与 AEB 这 2 种路径的航程:

$$L_{ACDB} - L_{AEB} = \left(\pi \frac{d}{2} + s - d\right) - \frac{\pi s}{2} = \frac{(\pi - 2)(d - s)}{2} < 0 \quad (1)$$

所以, 从航程角度看, 路径 $ACDB$ 比 AEB 更优, 期望艏向角变化情况如图 3 (b) 所示。

当 $s < d$ 时, 如图 2 (c), 先以 d 为直径作圆心

角为 $\pi + \varphi$ 的圆弧，再作圆弧末端点与平行线的相切圆，从而保证无人艇艏向角连续，如图 3 (c) 所示。由几何关系得：

$$\varphi = \arccos\left(\frac{s}{d}\right) \quad (\varphi \in (0, 90^\circ)) \quad (2)$$

3 平行线扫描路径规划

以长为 a ，宽为 b 的矩形区域 ($a > b$) 作为搜寻区域，根据第 2 节回转段运动分析，回转段探测区域与边界相切，平行线扫描路径规划可分为 3 种情形：1) $s = d$ ；2) $s > d$ ；3) $s < d$ 。

在平行线扫描路径规划中，存在未覆盖区域，

通过计算未覆盖区域面积，可得区域覆盖率 F ：

$$F = 1 - \frac{\sum \text{Area}}{a \cdot b} \quad (3)$$

为合理对比不同区域覆盖方法达到的区域覆盖率，本文定义单位航程区域覆盖率，区域覆盖率 F 与无人艇在搜寻区域中的航程 L 的比值，表示无人艇在单位航程中所能达到的区域覆盖效果，数值越大意味着无人艇航行相同航程所能覆盖的区域越多。定义式为

$$\eta = \frac{F}{L} \quad (4)$$

3.1 扫海宽度等于回转直径

当 $s = d$ 时，改进方法路径如图 4 (a) 所示。

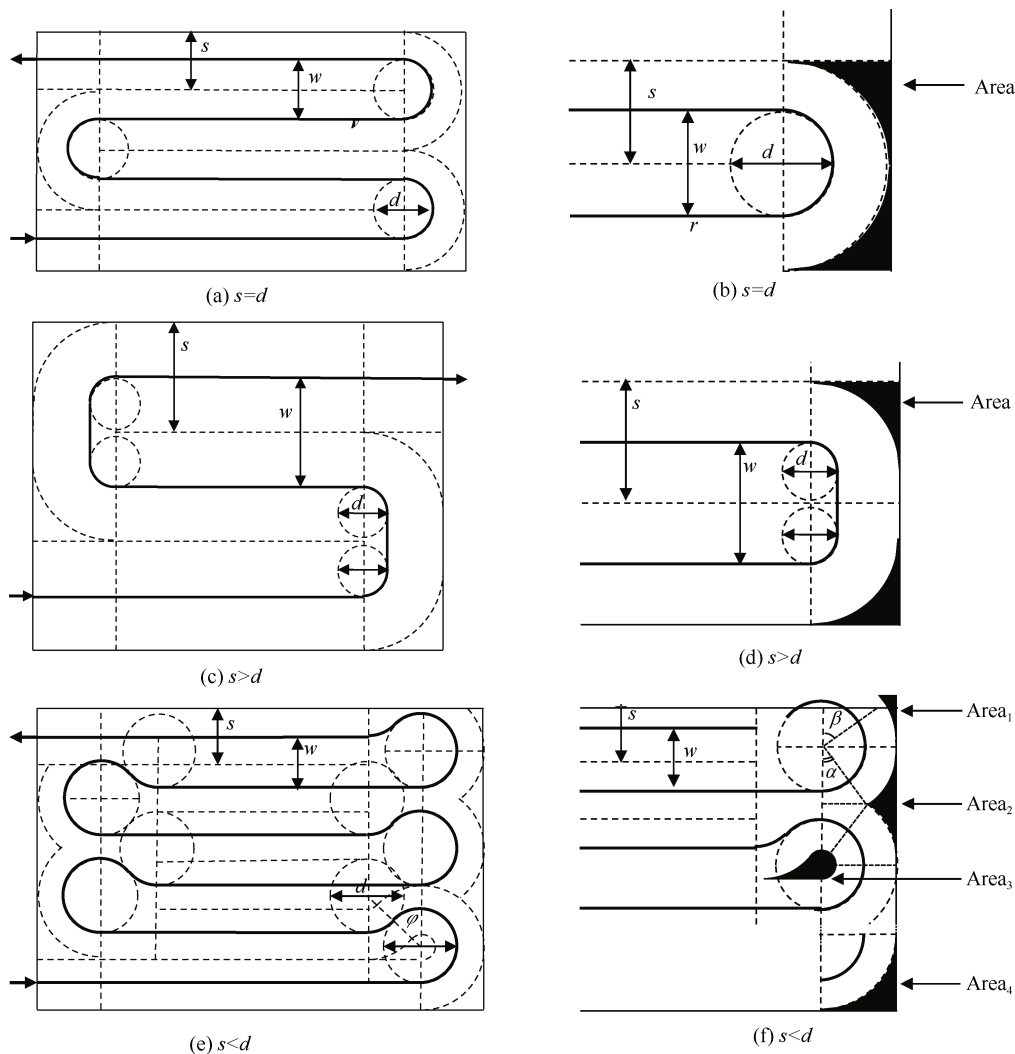


图 4 平行线扫描改进方法路径
Fig. 4 Improved path planning of parallel line-scanning

根据几何关系, 可得 $s=d$ 情形区域覆盖任务理论航程

$$L_{s=d} = n(a-d-s) + (n-1)\pi\frac{d}{2} + d + s = na - (n-1)(d - \pi\frac{d}{2} + s) \quad (5)$$

式中: n 为平行线的数量, 其值等于矩形区域宽度除以扫海宽度, 若有小数, 采用进一法取值。

如图 4 (b) 所示, 该情形一次回转未覆盖区域

$$\text{Area} = 2 \cdot \left[\left(\frac{d+s}{2} \right)^2 - \frac{1}{4} \cdot \pi \left(\frac{d+s}{2} \right)^2 \right] \quad (6)$$

那么, 针对 $s=d$ 情形的总未覆盖面积为 $(n-1)\text{Area}$ 。

3.2 扫海宽度大于回转直径

当 $s>d$ 时, 改进方法路径如图 4 (c) 所示。

根据几何关系, 可得 $s>d$ 情形区域覆盖任务理论航程

$$L_{s>d} = n(a-d-s) + (n-1)\left(\pi\frac{d}{2} + w-d\right) + d + s = na + (n-1)\left(\pi\frac{d}{2} + w-s-2d\right) \quad (7)$$

又因 $s=w$, 所以

$$L_{s>d} = na + (n-1)\left(\pi\frac{d}{2} - 2d\right) \quad (8)$$

如图 4 (d) 所示, 该情形一次回转未覆盖区域 Area 为

$$\text{Area} = 2 \cdot \left[\left(\frac{d+s}{2} \right)^2 - \frac{1}{4} \cdot \pi \left(\frac{d+s}{2} \right)^2 \right] \quad (9)$$

那么, 针对 $s>d$ 情形的总未覆盖面积为 $(n-1)\text{Area}$ 。

3.3 扫海宽度小于回转直径

当 $s<d$ 时, 改进方法路径如图 4 (e) 所示。

根据几何关系, 可得 $s<d$ 情形区域覆盖任务理论航程

$$L_{s<d} = n(a-s-d-2 \cdot d \cos \varphi) + d + (n-1)\left(\pi\frac{d}{2} + 2 \cdot \varphi\frac{d}{2} + d \cos \varphi\right) + s \quad (10)$$

如图 4 (f) 所示, 该情形存在 4 种形式未覆盖区域, 其值分别为

$$\begin{aligned} \text{Area}_1 &= \frac{d+s}{2} \cdot \left(\frac{3s}{2} - \frac{d}{2} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) \left(\frac{d+s}{2} \right)^2 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{3s}{2} - \frac{d}{2} \right) \frac{d+s}{2} \sin \beta \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{Area}_2 &= 2s \cdot \frac{d+s}{2} - \frac{1}{2} \cdot 2s \cdot \frac{d+s}{2} \sin \alpha - 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \left(\frac{d+s}{2} \right)^2 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{Area}_3 &= \frac{1}{2}(\pi + \varphi) \left(\frac{d-s}{2} \right)^2 + \frac{d+s}{2} \cdot d \cdot \sin \varphi - \frac{1}{2} \varphi \left(\frac{d+s}{2} \right)^2 - \frac{1}{2} d \cdot \sin \varphi \cdot d \cos \varphi \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{Area}_4 = \left(\frac{d+s}{2} \right)^2 - \frac{1}{4} \cdot \pi \left(\frac{d+s}{2} \right)^2 \quad (14)$$

其中: $\alpha = \arccos\left(\frac{2s}{d+s}\right)$; $\beta = \arccos\left(\frac{3s-d}{d+s}\right)$ 。

那么, 针对 $s<d$ 情形的总未覆盖面积为

$$\sum \text{Area} = 2 \cdot \text{Area}_1 + (n-3) \cdot \text{Area}_2 + (n-1)\text{Area}_3 + 2 \cdot \text{Area}_4 \quad (15)$$

4 结果与讨论

在地图中划定长 50 m, 宽 24 m 的矩形区域, 根据平行线扫描改进方法生成路径。设置巡航速度为 1 m/s, 无人艇在 1 m/s 初速时最小定常回转直径为 4 m, 3 组扫海宽度分别为 3 m、4 m、6 m。采用 L1 制导律^[17]和串级 PID 底层控制实现路径跟踪, 开展仿真试验。

区域覆盖任务中, 无人艇仿真轨迹与未覆盖区域如图 5 所示。计算无人艇单位航程区域覆盖率理论值 $\eta_{\text{理论}}$ 与仿真值 $\eta_{\text{仿真}}$, 如表 1 所示。

表 1 的 3 种情形中, 经典方法 $\eta_{\text{理论}}$ 与 $\eta_{\text{仿真}}$ 均小于改进方法。 $\eta_{\text{理论}}$ 后者较前者提高了 0.002 4 ($s=d$), 0.004 3 ($s>d$), 0.009 3 ($s<d$); $\eta_{\text{仿真}}$ 后者较前者提高了 0.010 6 ($s=d$), 0.013 0 ($s>d$), 0.000 8 ($s<d$)。一方面, 区域覆盖改进方法使无人艇在回

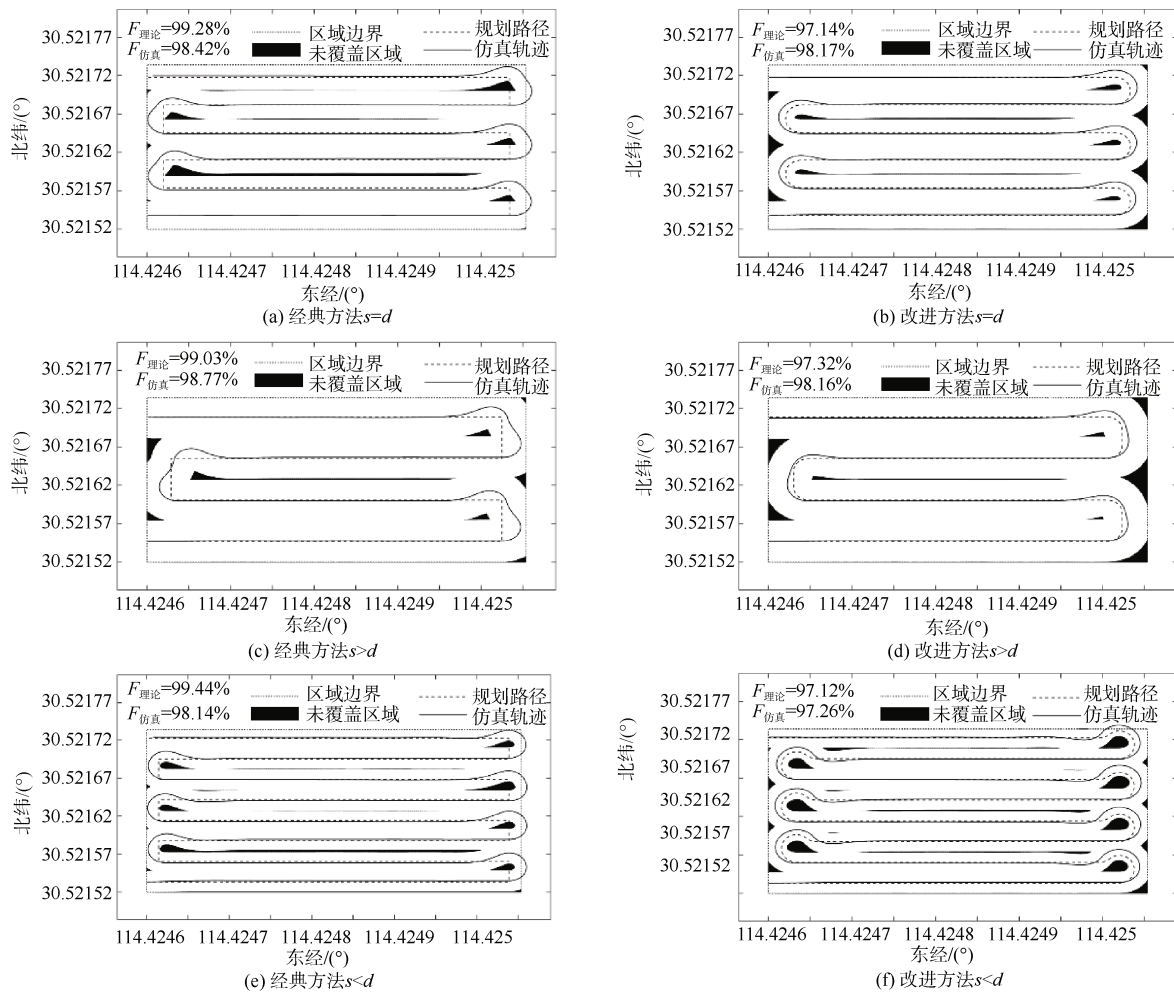


图 5 无人艇仿真轨迹及未覆盖区域

Fig. 5 USV's simulation trajectory and uncovered area

表 1 无人艇单位航程区域覆盖率

Table 1 Area coverage efficiency of USV per voyage

单位航程区域覆盖率	经典方法			改进方法			% / m
	$s = d$	$s > d$	$s < d$	$s = d$	$s > d$	$s < d$	
$\eta_{理论}$	0.330 9	0.495 2	0.248 6	0.333 3	0.499 5	0.257 9	
$\eta_{仿真}$	0.306 8	0.473 4	0.231 1	0.325 4	0.493 8	0.235 3	

转段区域覆盖重叠面积少,单位航程对应的覆盖区域优于经典方法;另一方面, $\eta_{仿真}$ 小于 $\eta_{理论}$, 则是因为系统响应存在时延,无人艇左右回转直径不完全相等造成。

为研究改进方法生成路径对无人艇艏向角跟随效果的影响,绘制无人艇回转段艏向角变化与轨迹,如图 6 所示。

图 6 中 3 种情形,经典方法生成路径,期望艏

向角阶梯变化,无人艇艏向角难以有效跟随;区域覆盖改进方法生成路径,期望艏向角连续变化,无人艇艏向角随路径期望艏向角连续变化。如图 6(f) 所示,仿真 $s < d$ 情形,无人艇回转段结束时艏向角变化存在滞后。结合图 2(c),因为无人艇在 E 点,要求舵角瞬时从左满舵转向右满舵,舵效作用需要一段时间,所以无人艇跟踪路径时存在艏向角变化滞后情况。

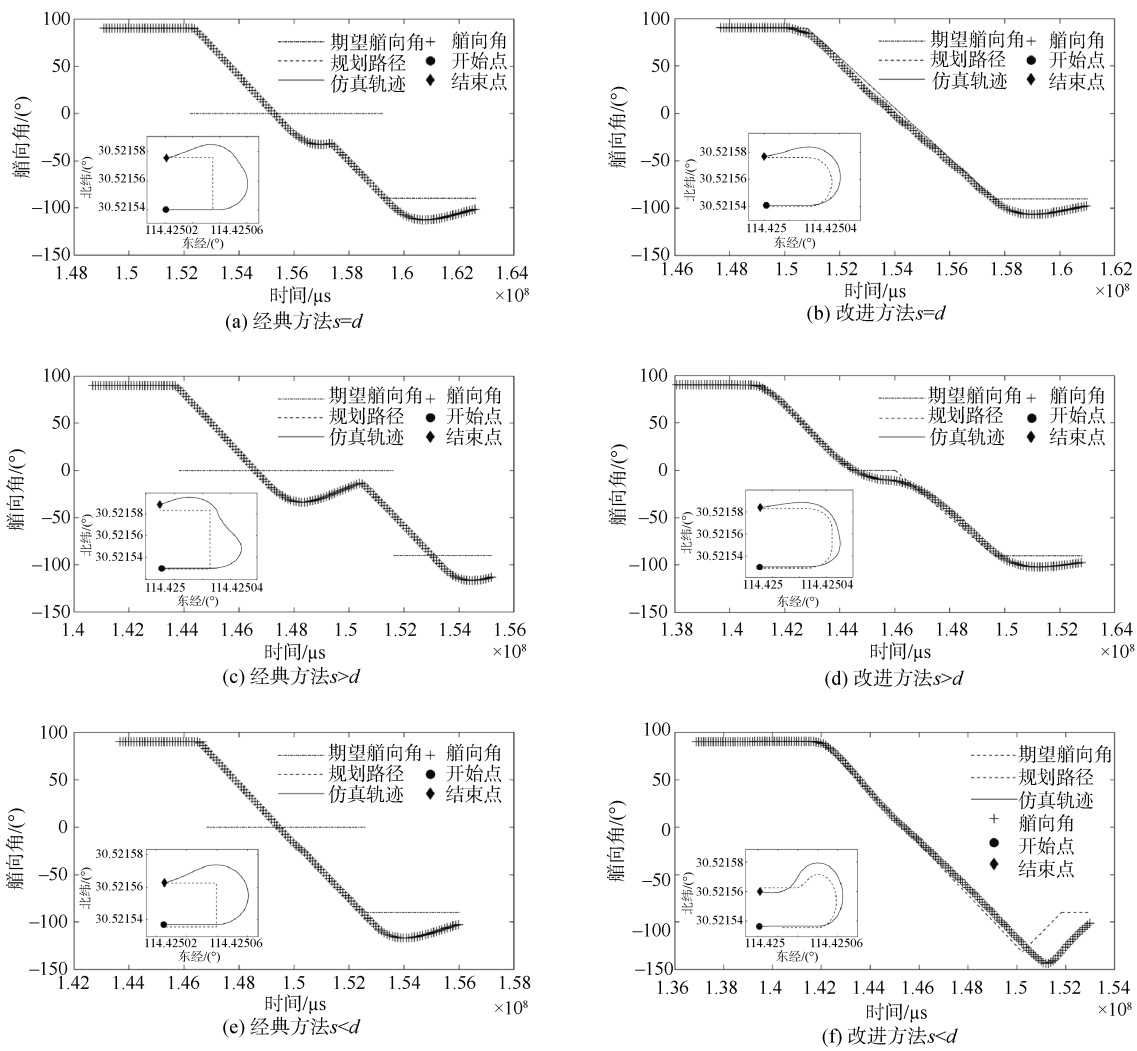


图 6 无人艇回转阶段仿真船向角变化
 Fig. 6 USV's heading angle curve during turning period of simulation

此外, 研究改进方法生成路径对无人艇路径跟踪效果的影响, 绘制无人艇回转段路径跟踪误差最大值 $error_{max}$ 柱状图, 并标记平均值 $error_{avg}$, 如图 7 所示。

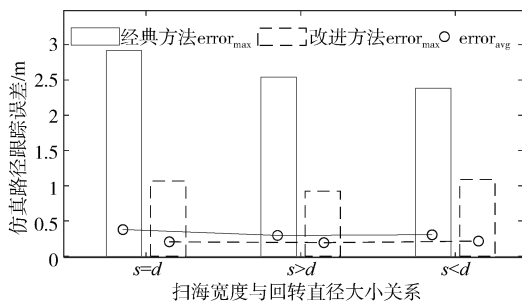


图 7 无人艇仿真路径跟踪误差
 Fig. 7 Tracking error of USV's simulation path

图 7 中 3 种情形, 经典方法 $error_{max}$ 与 $error_{avg}$ 均大于改进方法。因为改进方法考虑了无人艇船向角连续性与回转直径影响, 而无人艇在航行过程中, 位置改变是由姿态改变引起的, 所以改进方法生成路径使无人艇路径跟踪效果更好。

仿真结果中, 改进方法 3 种情形, 单位航程区域覆盖率均大于经典方法, 路径跟踪误差最大值与平均值均小于经典方法。仿真结果表明: 改进方法生成路径, 提高了无人艇单位航程区域覆盖率, 提高了无人艇路径跟踪效果, 可用于区域覆盖任务中。

5 结束语

本文基于无人艇操纵性, 根据扫海宽度与无人

艇定常回转直径大小关系, 结合无人艇艏向角连续, 着重对回转段进行运动分析与规划, 提出平行线扫描路径规划改进方法, 并利用仿真试验验证。

相比经典方法, 改进方法可实现对任意无人艇回转直径与扫海宽度进行区域覆盖路径规划。仿真结果表明, 无人艇回转直径等于、大于和小于扫海宽度 3 种情形, 平行线扫描路径规划改进方法提高了无人艇单位航程区域覆盖率, 提升了路径跟踪效果。

后续将进一步研究期望艏向角连续且可导的运动规划方法, 使期望角速度连续, 解决艏向角变化滞后问题。

参考文献

- [1] CAO Z L, HUANG Y, HALL E L. Region filling operations with random obstacle avoidance for mobile robots[J]. *Journal of Robotic Systems*, 1988, 5 (2): 87-102.
- [2] CHOSET H. Coverage for robotics – a survey of recent results[J]. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 2001, 31 (1): 113-126.
- [3] CHOSET H, PIGNON P. Coverage path planning: the Boustrophedon cellular decomposition[C]//ZELINSKY A. *Field and Service Robotics*. London: Springer, 1998.
- [4] GALCERAN E, CARRERAS M. A survey on coverage path planning for robotics[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, 61 (12): 1258-1276.
- [5] 万明, 代忠, 褚文奎. 无人机扫描线区域覆盖中的转弯航迹规划[J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(9): 1750-1754.
- [6] BERGER C, WZOREK M, KVARNSTRÖM J, et al. Area coverage with heterogeneous UAVs using scan patterns[C]//2016 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR). Lausanne: IEEE, 2016.
- [7] COOMBES M, CHEN W, LIU C. Boustrophedon coverage path planning for UAV aerial surveys in wind[C]//2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Miami: IEEE, 2017.
- [8] BRODERICK J A, TILBURY D M, ATKINS E M. Optimal coverage trajectories for a UGV with tradeoffs for energy and time[J]. *Autonomous Robots*, 2014, 36 (3): 257-271.
- [9] DU Z, WEN Y, XIAO C, et al. Motion planning for unmanned surface vehicle based on trajectory unit[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 151: 46-56.
- [10] KRATZKE T M, STONE L D, FROST J R. Search and rescue optimal planning system[C]//2010 13th International Conference on Information Fusion. Edinburgh: IEEE, 2010.
- [11] MANDA D, THEIN M, ARMSTRONG A. Depth adaptive hydrographic survey behavior for autonomous surface vessels[C]//OCEANS 2015-MTS/IEEE. Washington: IEEE, 2015.
- [12] 苗润龙, 庞硕, 姜大鹏, 等. 海洋自主航行器多海湾区域完全遍历路径规划[J]. *测绘学报*, 2019, 48(2): 256-264.
- [13] ESPENSEN A H, AVER O E, POULSEN P K, et al. Seabed coverage path re-routing for an autonomous surface vehicle[C]// International Symposium on Computing and Artificial Intelligence. Chan: Springer, 2019.
- [14] 刘广强. 海上搜寻中确定扫海宽度的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2009.
- [15] 胡志武, 毕曙光, 耿鹤军. 海上搜寻区域确定的计算机辅助方法[J]. *上海海事大学学报*, 2008(2): 11-16.
- [16] HUANG W H. Optimal line-sweep-based decompositions for coverage algorithms[C]//Proceedings 2001 ICRA. Seoul: IEEE, 2001.
- [17] PARK S, DEYST J, HOW J. A new nonlinear guidance logic for trajectory tracking[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Rhode: AIAA, 2004.

(责任编辑: 张曼莉)