

基于多目标遗传算法的激光雷达养殖车间水质巡检系统

田昌凤^{1,2}, 车 轩^{1,2}, 张成林^{1,2*}, 周 寅¹, 李新丰¹, 刘安东¹

(1. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092; 2. 农业农村部渔业装备与工程技术重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 为解决强噪声、低光照、高湿度环境下循环水养殖车间水质巡检难题, 该研究提出基于三维激光雷达定位技术的水质巡检系统, 同时采用多目标遗传算法求解考虑 5 个主要因素 (包括安全性、距离、平稳性、行程持续时间和无碰撞路径) 的机器人最佳巡检路径, 并通过试验验证水质巡检系统可行性。研究结果表明, 当巡检系统以 0.5 m/s 巡航时, 实际导航路径与目标路径的最大横向偏差为 7.2 cm, 最大纵向偏差为 6.3 cm, 最大航向偏差为 6.9°; 基于多目标遗传算法的路径规划相较于多目标进化和随机同源类查找器方法, 在行驶路径相同的条件下路径规划时间分别减少了 31% 和 42%, 在同一路径且障碍物数量相同的条件下障碍物碰撞率分别降低了 15% 和 31%。研究结果可为养殖车间水质巡检系统研发提供参考。

关键词: 机器人; 激光雷达; 路径规划; 多目标遗传算法; 水质巡检

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406095

中图分类号: TP24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-22-0062-07

田昌凤, 车轩, 张成林, 等. 基于多目标遗传算法的激光雷达养殖车间水质巡检系统[J]. 农业工程学报, 2024, 40(22):

62-68. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406095 <http://www.tcsae.org>

TIAN Changfeng, CHE Xuan, ZHANG Chenglin, et al. Laser radar water quality inspection system for recirculating aquaculture workshop based on multi-objective genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(22): 62-68. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406095 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

循环水养殖车间是一种在室内进行水产品养殖和生产的车间。传统车间一般采用人工对鱼类生物的健康状态、行为特征进行观察, 成本与劳动强度较高, 检测时效性低, 导致鱼类的死亡率和发病率较高。采用水质巡检系统对养殖池进行定期巡检, 不仅可以降低养殖工人的劳动强度, 还可以及时发现养殖池内水质的异常情况, 减少经济损失。然而循环水养殖车间属于低照度、高湿度、多障碍物的复杂场景, 水质巡检系统自动化作业难以得到安全保障, 这严重制约着水质巡检系统的发展, 因此亟需安全可靠的水质巡检系统以及精确的路径规划技术。

由于循环水养殖车间湿度大、光照条件较差, 且存在大量养殖设施以及配套装备, 采用单一目标路径规划方法无法满足水质巡检系统作业需求。因此, 在路径规划时需要考虑机械手臂运动协调性、检测位置、运动平稳性、行程持续时长和无碰撞路径等, 既要保证巡检系统作业手臂规范测量, 又要保证机器人运动平稳、巡检系统与养殖设施无碰撞, 因此水质巡检机器人路径规划可看作多目标规划问题。传统的多目标规划优化算法首

先将多目标函数进行加权或约束, 再利用成熟的单目标优化算法依次进行求解。虽然这种方法简便、快捷, 但目标函数加权值的分配具有较强的主观性, 优化效果往往达不到预期。针对多目标优化问题, 多目标遗传算法高效实用, 具有不受问题性质以及人为主观因素限制, 可快速搜索出全局最优解等优势, 为水质巡检系统路径规划提供了良好的参考。如 PANIAGUA 等^[1] 基于可变邻域搜索创建了多目标优化邻域搜索算法 (multi-objective variable neighborhood search, MOVNS), 但该方法对静态环境的依赖使其无法在动态环境中计算路径。PALMIERI 等^[2] 基于加权随机行走开发了随机同源类查找方法 (robust random cut forest, RHCF), 可查找动态障碍物周围的不同路线。Dijkstra 算法和粒子群优化融合一般被用来找到具有最小路径长度和最大路径平滑度的无碰撞路径^[3], 仅需通过增加执行时间, 便可找到最佳路径。朱金磊等^[4] 使用了一种基于局部最优解的改进人工蜂群算法, 但执行时间和最小路径长度搜索无法有效得到平衡。SHAHRIARI 等^[5] 创建了一种解决方案来平衡算法的收敛时间和搜索能力之间的冲突, 然而该方法未考虑水质巡检系统路径规划动力学问题, 导致巡检系统运动偏移误差较大。考虑到在水质巡检过程中可能会出现障碍物, 需要及时避让, 肖献强等^[6] 创建了一种轮式水质巡检系统路径跟踪方法, 利用 B 样条曲线构建平滑无碰撞的路径, 但该方法仅适用于静态避障。为了躲避三维地形突然出现的障碍物, 闫蓓平等^[7] 创建了一种基于测地线的路径规划方法, 然而该方法在动态环境中

收稿日期: 2024-06-01 修订日期: 2024-08-20

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFD2001700); 现代农业产业技术体系国家大宗淡水鱼体系养殖设施与装备 (CARS-45-26)

作者简介: 田昌凤, 副研究员, 研究方向为渔业装备工程。

Email: tianchangfeng@fmri.ac.cn

*通信作者: 张成林, 博士, 副研究员, 研究方向为渔业装备工程。

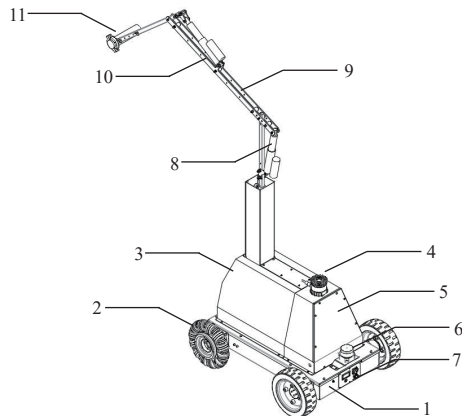
Email: zhangchenglin@fmri.ac.cn

无法进一步预测障碍物的后续位置。NI 等^[8]提出一种用于移动车辆路径规划的蚁群算法,将起点和终点与障碍物联系起来,但忽略了最短路径规划。MOHANTY 等^[9]应用入侵杂草优化技术实现了下水水质巡检系统最佳路线规划,然而该方法没有考虑多个水质巡检系统之间的相互影响,因此无法处理复杂环境中的动态障碍。XUE 等^[10]提出了一个机器人路径规划框架,但在计算时间或可行性方面没有明显差异。

上述研究还不能解决目前水质巡检系统路径规划方面的许多问题,包括时间复杂性高、无法在最短时间内选择最佳路线、无法考虑动态避障等,且现有的水质巡检系统路径规划以水下机器人为主,在循环水养殖车间这类多障碍物、多干扰源复杂场景还未应用。为此,本文提出基于多目标遗传算法的水质巡检系统路径规划方法。首先基于群体多目标的适应度函数获得的适应度值;然后基于 Ring 交叉编译方法交换字符串并创建新的、修改过的字符串;将选择方法用于新创建的个体中;最终选择出适合水质巡检系统运动的最优路径。

1 养殖车间水质巡检系统组成

本研究设计的水质巡检系统主要由机器人主体结构 and 自主导航与控制系统两部分构成,如图 1 所示。



1. 机器人底盘 2. 麦克纳姆轮 3. 机器人外壳 4. 激光雷达 5. 控制柜 6. 摄像头 7. 充电装置 8. 机械臂驱动电机 9. 机械臂 10. 机械臂驱动电机 11. 水质探头
1. Robot chassis 2. Mecanum wheels 3. Robot body shell 4. Laser radar 5. Electric control cabinet 6. Camera 7. Charging device 8. Manipulator arm drive motor 9. Manipulator arm 10. Manipulator arm drive motor 11. Water quality probe

图 1 水质巡检系统组成结构示意图

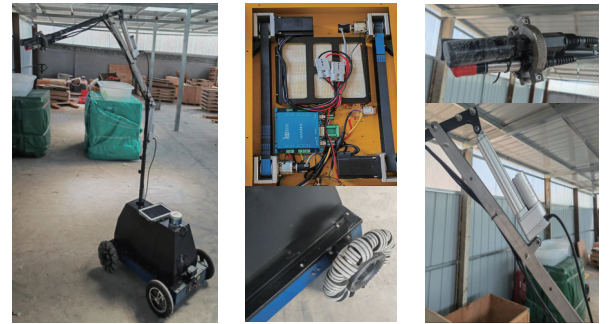
Fig.1 Structure diagram of water quality inspection system

机器人主体结构是任务指令的具体执行者,自主导航与控制系统负责设置车载硬件系统工作模式、发布路径点指令和实时显示车载系统运行状态,以及负责控制采样系统。机器人主体结构长 908 mm,宽 708 mm,高 1 650 mm,总质量 180 kg,最大行驶速度 1.5 m/s。

1.1 机器人主体结构

机器人主体结构主要包括移动平台和水质采样系统组成,如图 2 所示。其中移动平台主要由底盘、轮毂、传动装置、驱动电机以及主体外壳等组成。考虑到养殖车间障碍物密集的特点,平台底盘采用四轮四驱式差速

底盘以及两轮蜂窝轮组合两轮麦克纳姆轮结构。该结构具有运动灵活、可原地转向、小半径差速转向、良好越障能力等优势。此外,采用麦克纳姆轮,可有效降低轮胎磨损,延长轮胎使用寿命。水质采样结构由升降云台、连杆装置、水质检测探头等组成。升降云台结合连杆装置构成机械臂,将水质检测探头伸入至检测位置。水质检测探头数据由检测主机通过总线传输至工控机或者手机保存。



a. 机器人
a. Robot
b. 移动平台内部和轮毂
b. Hub and internal of robot
c. 水质探头和机械手臂
c. Water quality probe and manipulator arm

图 2 机器人主体结构示意图

Fig.2 Main structure diagram of robot

1.2 自主导航与控制系统

自主导航系统主要包括定位系统、控制系统以及执行系统,如图 3 所示。

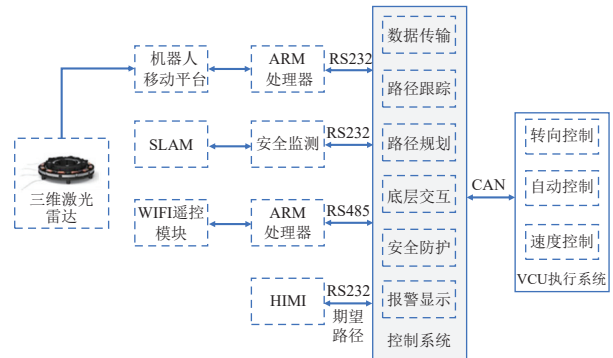


图 3 自主导航系统组成示意图

Fig.3 Schematic diagram of autonomous navigation system composition

定位系统采用三维激光雷达 Slam 进行建图与定位,雷达型号为镭神 16 线 C16-700D,主要由发射系统、接收系统、信息处理三部分组成,雷达测量距离可达 40 m,重复定位误差小于 2 cm,最大建图面积为 90 000 m²,建图分辨率为 5 cm,可覆盖养殖车间并能分辨车间障碍物最小尺寸。其主要工作原理是通过发射激光束并接收其反射信号获取目标物体每个点的距离、角度和反射光强度等信息,并将测量的距离和角度等信息转换为三维坐标,生成一个包含多个点的三维点云数据集,每个点代表一个物体或表面。执行系统基于 STM32F103 嵌入式主板作为底层控制器,根据编码器提供的速度信息,通过运动学解算获得移动平台的里程计数据,运行 PID 算法,实现移动平台的驱动控制。控制系统基于机器人操作系

统 ROS (robot operating system) 架构运行机制和移动平台的硬件组成制定 ROS 与 STM32F103 的串口通讯协议。同时装载有 Wifi 模块, 可通过手机 App、电脑等终端进行作业点规划与设置, 与底层共同控制移动平台到达指定位置并停车, 直到采样作业结束, 导航系统控制车辆进入下一个作业位置点。

2 基于多目标遗传算法的巡检路径规划

机器人路径规划是保障水质巡检系统安全运行的核心, 对巡检系统在静态和动态障碍物等特定环境中的运动控制起重要作用, 其目的是寻找两个指定位置之间的最优路径。由于在巡检路径上存在大量障碍物, 水质巡检系统必须找到具有多个目标函数的最优路径, 这些目标函数包括最小长度路径、安全性路径、无碰撞路径、行进时间最短路径和能量消耗最小路径^[11-12]。基于这一思想, 本文引入多目标遗传算法。假设在起点 A 和终点 B 之间存在可行的路径 P_1 、 P_2 和 P_3 , 在多条可能路径中, 巡检系统选择一条最优路径, 以最短时间到达目标点, 如图 4 所示。

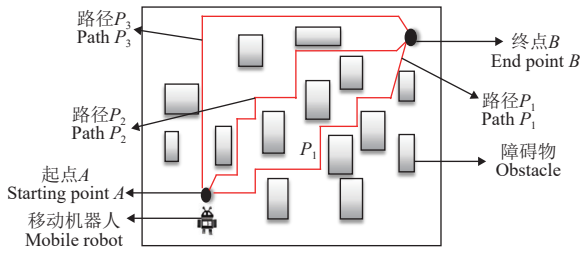


图 4 巡检系统路径规划示意图

Fig.4 Path planning schematic diagram of inspection system

2.1 多目标遗传算法

本文采用元启发式路径搜索的多目标遗传算法, 旨在解决多障碍物、高湿度条件下养殖车间水质巡检系统自主导航难题。其中元启发式算法是启发式算法的改进, 结合了随机算法与局部搜索算法, 可为机器人路径优化问题提供最佳解决方案。首先随机生成初始路径种群 P , 可表示如下:

$$P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_i\} \quad (1)$$

式中 P_i 表示不同的路径, 在机器人路径群体初始化之后, 基于多目标函数确定每个个体的适应度函数, 适应度函数是用于路径规划优化的目标函数, 具有多个目标函数的适应度可表示如下^[13-15]:

$$F_{fitness} = \min D(A, B) + \max(\text{smoothness}) + P_{\text{collision-free}} + C_{\text{number}} + \min(T_{\text{travel}}) \quad (2)$$

式中 $F_{fitness}$ 表示本文具有 5 个目标函数的适应度函数, 即最小距离 ($\min D(A, B)$)、最大路径平滑度 ($\max(\text{smoothness})$)、无碰撞路径 ($P_{\text{collision-free}}$)、碰撞次数 (C_{number}) 以及最短行进时间 $\min(T_{\text{travel}})$ 。

在多目标路径规划过程中, 一般优先选择从起点到终点的最短路径, 因此, 需要首先考虑最小路径距离目

标这一函数。起点和终点之间的距离根据曼哈顿距离进行计算, 表示欧几里得空间固定直角坐标系上两点间线段对轴投影的长度总和, 最小路径距离的目标函数可表示为

$$D(A, B) = \sum_{i=1}^n |a_i - b_i| \quad (3)$$

式中 $D(A, B)$ 表示 A 和 B 两点之间的距离。 a_i 和 b_i 表示起点和终点沿方向 n 的坐标, n 取 1, 2, 3。

第二个目标函数是基于能量消耗的路径平滑度函数。可以通过减少机器人的转弯次数提高路径平滑度。机器人运动过程中, 路径上可能存在多个障碍物, 机器人需要及时做出特定动作进行躲避, 通过控制机器人的躲避动作及其与障碍物之间的最小距离可以降低路径能耗, 具体的函数可以表示为

$$E(t) = \frac{1}{\sum_{i=1}^m (D_A - O_i)} \quad (4)$$

式中 $E(t)$ 表示机器人路径规划所消耗的能量。 $D_A - O_i$ 表示起点与其邻近障碍物 O_i 之间的距离。 m 表示障碍物数量。通过最小化路径上的障碍物数量使能源消耗最小, 路径平滑性最大, 得到 $\max(\text{smoothness})$ 。

减少碰撞次数 (C_{number}) 是机器人的导航过程中主要目标, 其能耗和到达终点的时间也会减少, 从而得到多目标最优无碰撞路径。

行进时间 (T_{travel}) 表示机器人从起点到达终点所花费的总时间, 具体的目标函数为

$$T_{\text{travel}} = T_B - T_A \quad (5)$$

式中 T_A 表示从起点出发的时刻, T_B 表示到达终点的时刻。

最终, 基于上述目标函数, 计算得到种群中所有路径的适应度。如果种群中的某一路径满足所有目标函数准则, 则可以直接作为最优路径; 否则, 需要进一步通过多目标遗传算法继续选择最优路径。

2.2 多目标遗传算法流程

在进行多目标遗传算法计算过程中, 首先初始化路径数量, 然后计算多个目标函数测量个体路径的适应度, 并在满足适应度准则的路径中选择路径作为水质巡检系统的最优路径, 或者用锦标赛选择法^[16]从群体中选出最佳个体; 然后进行 2 条染色体的交换, 使用循环交叉^[17]产生新的后代, 紧接着执行自适应比特突变^[18]以随机交换输入比特串。在执行遗传算子之后, 计算该路径的适应度, 并检查适应度标准。重复上述过程, 直到满足指定条件为止。本文多目标遗传算法计算流程如下:

- 1) 初始化路径种群 $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_i\}$;
- 2) 使用式 (2) 计算具有多个目标函数的个体适应度;
- 3) 如果路径满足式 (2), 那么就将其作为最优路径; 否则采用锦标赛法选择种群中的合适个体;
- 4) 使用循环交叉生成新子代;
- 5) 执行自适应比特串突变以反转位串;
- 6) 将旧路径替换为遗传算法得到的新路径;

7) 返回步骤 3) 循环迭代, 直到满足式 (2) 为止。

3 多目标遗传算法仿真性能对比

为保证所获得结果的客观性和准确性, 采用本文提出的多目标遗传算法与现有的多目标优化邻域搜索算法 (multi-objective variable neighborhood search, MOVNS) 和随机同源类查找方法 (robust random cut forest, RCHF) 进行 10 次仿真模拟, 对比其行进时间和不同路径距离的路径规划性能。在仿真中设置路径总群数为 20, 障碍物数为 5, 其中静态障碍物为 3, 动态障碍物为 2。

本文使用曼哈顿距离表示从起点到终点的最短路径长度。由图 5 可知, 当路径距离为 120 m 时, 采用本文的多目标遗传算法进行路径规划后的机器人行进时间为 25 ms, MOVNS 需要 36 ms, RCHF 需要 43 ms。与 MOVNS 和 RCHF 相比, 在行驶相同路径距离的条件下本文算法行进时间分别减少了 31% 和 42%。类似地, 计算所有可能的路径距离和行进时间。

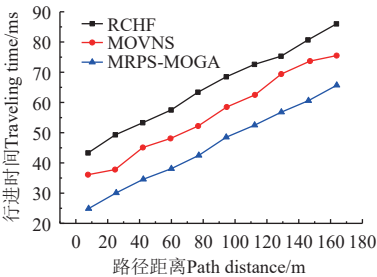


图 5 不同方法下的最小路径距离和行进时间
Fig.5 The minimum path distance and travel time under different methods are used

当路径中存在障碍物时, 水质巡检系统会向前、向后、向右和向左等不同方向移动进行避障, 避障步骤数增加, 机器人的能耗也增加, 这种情况下的路径并不是最佳路径。因此, 本文根据能量消耗来衡量路径的平滑度, 表 1 为 3 种方法的障碍物数量与路径平滑度的关系。

表 1 不同障碍物数量的能耗对比
Table 1 Comparison of energy consumption with different numbers of obstacles

障碍物数量 Obstacle number	能耗 Energy consumption/J		
	本文算法 Present study	MOVNS	RCHF
2	110	132	157
4	122	143	169
6	136	163	197
8	142	167	200
10	145	170	204
12	148	173	205
14	156	193	221
16	174	210	243
18	186	224	254
20	193	228	256

根据表 1, 无论障碍物多少, 本文采用的算法所需要的能耗均低于采用 MOVNS 和 RCHF 算法所需要的能耗。当路径中有 2 个障碍物时, 采用本文算法能耗为 110J, 而使用 MOVNS 和 RCHF 的能耗分别为 132 和 157J。与 MOVNS 和 RCHF 相比, 在同一路径障碍物数量相同条件下本文算法能耗分别降低了 15% 和 31%。

这是由于 MOVNS 和 RCHF 算法在遇到动态障碍物时会不断尝试和试错新的路线, 而不是直接找寻最优路线, 导致能耗更高、规划效率更低。

此外, 计算耗时也是评估算法性能的重要指标, 在本文中指使用多个目标函数推导最优路径以及实现遗传算法算子所需的时间量^[19]。本文算法与 MOVNS 和 RCHF 的计算耗时对比结果如图 6 所示。

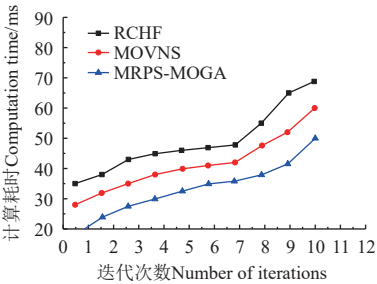


图 6 不同方法下的迭代次数与计算耗时
Fig.6 Iteration times and computation time under different methods are used

由图 6 可知, 与现有方法相比, 本文算法的路径规划时间明显降低, 与 MOVNS 和 RCHF 相比, 分别降低了 20% 和 33%。

4 巡检系统性能测试试验

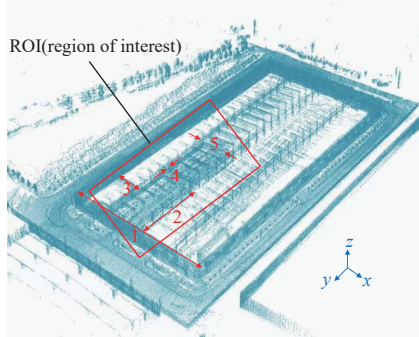
巡检系统的性能评价指标主要包括三维激光雷达 SLAM 建图的准确度、定位与导航精度、自主避障精度以及水质检测有效率。建图准确度是指点云图尺寸与实际场景尺寸的匹配程度^[20]。系统定位精度是指定位算法获取的位置信息与实际位置的偏差, 系统导航精度是指移动平台预设生成的路径与实际运动路径的偏差^[21]。系统自主避障精度是指系统在执行避障任务时的准确性和效率, 用系统能够安全避让障碍物的最小空间距离表征^[22]。水质检测有效率是指巡检系统与人工检测的结果一致性, 与系统采样机械手臂的稳定性有关, 若机械手臂在采样过程中发生较大抖动则水体采样不稳定, 造成与人工检测误差较大^[23]。测试在中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所试验车间进行, 车间长 50 m, 宽 20 m。

4.1 三维激光雷达 SLAM 建图准确度

本研究通过远程客户端远程控制巡检系统在试验车间内以 0.5 m/s 的速度直行, 并收集激光点云和运动信息, 基于三维激光雷达 Salm 建立试验车间三维点云图, 如图 7 所示。由于激光雷达采集的原始试验车间三维点云每一帧约为 5.4 万个点, 数据量庞大, 为减少计算量, 对原始三维点云进行预处理。

为此, 使用直通滤波算法提取 (region of interest, ROI) 点云, 并对点云采用体素下采样, 从而实现在保留三维点云数据特征前提下降低点云数量^[24]。为更好分辨出车间走道与车间障碍物点云, 首先采用地面平面拟合 (ground plane fitting, GPF) 算法^[25]分割地面和非地面点云; 然后使用高度阈值将车间三维点云分割成走道点云和障碍物点云, 并将障碍物高度阈值设置为 1.6 m; 同

时, 将走道点云投影至平面, 使用最小二乘蒙特卡洛 (least squares monte carlo, LSM) 方法提取走道路径线与初始路径。最终, 将障碍物点云投影至 xy 平面上, 提取其点云边界轮廓特征, 并根据边界轮廓优化导航路径。



注: 1~5 为测量位置。
Note: 1-5 is test location

图 7 试验车间三维点云图

Fig.7 Three-dimensional point cloud image of experiment workshop

使用卷尺测量试验车间的宽度、障碍物与墙面距离以及障碍物之间的距离等, 测量位置分别记为 1~5。在可视化机器人系统 (robot visualization) 上获取位置 1~5 的点云图测量值, 并与实测数据进行对比, 对比结果如表 2 所示。从表 2 可以看出, 最终建立的点云数据与实际测量结果相比偏小, 但差距较小, 最大误差为 2.1%, 最小误差为 0.5%, 因此本研究建立的点云图满足巡检系统使用需求。

表 2 建图误差
Table 2 Mapping error

位置 Location	点云图测值 Point cloud measurement value/m	实测值 Actual measurement value/m	建图误差 Mapping error/%
1	19.58	20.0	2.1
2	7.87	8.0	1.6
3	3.46	3.5	1.1
4	1.00	1.0	0.0
5	1.98	2.0	0.8

4.2 巡检系统定位与导航精度

导航精度测试试验参考文献 [26] 方法, 设置 2 组障碍物, 4 组导航目标点位。定义车头初始朝向为 y 轴正方向, 重力加速度方向为 z 轴, 垂直 y 轴方向为 x 轴。具体试验流程如下: 巡检系统移动平台以 0.5 m/s 的速度从起点出发后依次通过测试目标点 1、2、3、4, 每到达一个目标点后停留 30 s, 记录目标点处的横向偏差、纵向偏差以及航向偏差 (以航间道路中心线为基准), 试验重复 3 次, 结果取平均值。如图 8 所示, 各目标点导航偏差的测量方法为: 在测试车间水平地面上, 设测试点 1 为原点 $(0, 0)$, 测试点 2、3、4 以及测试起点的绝对坐标分别为 $(0, 1.25)$ 、 $(-0.5, 1.25)$ 、 $(-1.0, 0)$ 、 $(-0.5, -1.25)$, 各测点实际坐标采用手工测得。

假设测试目标点坐标为 (x_0, y_0) , 实际点坐标为 (x_1, y_1) , 则横向偏差为 $|x_1 - x_0|$, 纵向偏差为 $|y_1 - y_0|$, 航向偏差为实际航向与目标航向的夹角。试验结果如表 3

所示, 可以看出, 随着目标点的增多, 导航偏差由于累计误差的原因均增大, 其中横向最小偏差为 4.5 cm, 最大偏差为 7.2 cm, 纵向最小偏差为 3.6 cm, 最大偏差为 6.3 cm, 航向最小偏差为 4.1°, 最大偏差为 6.9°, 该精度可满足养殖车间导航定位需求。

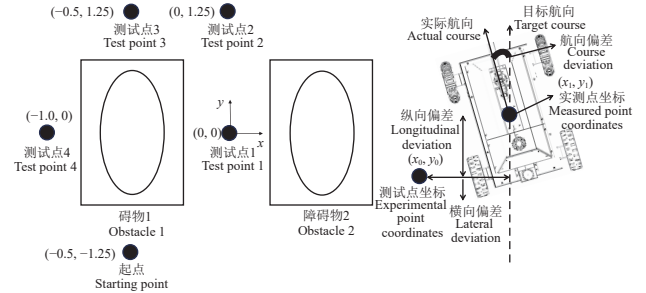


图 8 导航精度试验示意图

Fig.8 Schematic diagram of navigation accuracy experiment

表 3 定位与导航精度测试结果

Table 3 Experimental results of positioning and navigation accuracy

测试点 Measuring point	横向偏差 Lateral deviation/cm	纵向偏差 Longitudinal deviation/cm	航向偏差 Course deviation/(°)
1	4.5	3.6	4.1
2	5.4	4.7	5.2
3	5.1	4.2	4.6
4	7.2	6.3	6.9

4.3 巡检系统自主避障精度和水质检测有效率

在巡检系统自主避障精度性能测试试验中, 设置 2 组障碍物, 障碍物上方放置装满水的塑料水盆, 障碍物高 1.6 m, 长 2 m, 宽 1.5 m, 用于模拟养殖车间水池, 如图 9 所示。

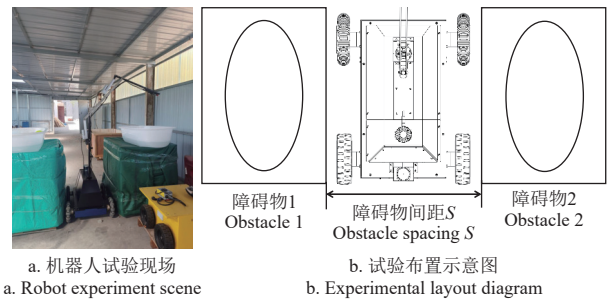


图 9 水体采集试验示意图

Fig.9 Schematic diagram of water collection experiment

障碍物之间的距离分别设为 10、15、20、25、30 cm。具体试验过程如下: 巡检系统以 0.5 m/s 速度从起点出发, 改变障碍物之间的距离 (0.8、0.9、1.0、1.1 m), 到达采样点后开始作业, 观察机器人底盘是否与障碍物发生碰撞, 试验重复 3 次并进行记录。

机器人碰撞测试试验结果如表 4 所示, 可以看出, 随着障碍物之间距离的增加, 机器人底盘发生碰撞的概率降低, 仅当障碍物距离为 0.8 m 时, 3 次重复试验中出现 1 次碰撞, 而实际车间走道大于 0.8 m, 机器人自主避障精度满足巡检系统使用需求。

在水体检测有效性测试试验开展前, 人工测量养殖

池内水体的温度、酸碱度以及溶解氧浓度并记录，然后启动巡检系统进行水质检测，观察巡检系统作业手臂是否发生抖动，并将检测结果与人工检测结果进行对比。

表 4 碰撞试验结果
Table 4 Collision test results

障碍物间距离 Distance of obstacle/m	碰撞情况 Collision situation		
	试验 1 Test 1	试验 2 Test 2	试验 3 Test 3
0.8	0	1	0
0.9	0	0	0
1.0	0	0	0
1.1	0	0	0

注：1 表示机器人底盘或者机械手臂与障碍物发生碰撞，0 表示未发生碰撞。
Note: 1 indicates that the robot chassis or mechanical arm collides with the obstacle, and 0 indicates does not collide with the obstacle.

水质检测试验结果如表 5 所示，可以看出机器人检测的水体水温、溶解氧、酸碱度与人工检测结果一致，且机械手臂水质检测过程中并未发生明显抖动，说明水质巡检系统可替代人工在养殖车间进行水质检测作业。

表 5 水质检测试验结果（3 次）
Table 5 Experimental results of water quality detection (3 times)

检测方法 Detection method	温度 Temperature/℃			溶解氧浓度 Concentration of dissolved oxygen/(mg·L ⁻¹)			pH 值 pH value		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
人工	24.3	24.3	24.3	2.4	2.4	2.4	6.8	6.8	6.8
机器人	24.3	24.3	24.3	2.4	2.4	2.4	6.8	6.8	6.8

5 结 论

针对强噪声、低光照、高湿度环境下循环水养殖车间水质检测时效性差、人工检测成本高等难题研制了水质巡检系统，主要结论如下：

1）仿真结果表明，与 MOVNS 和 RCHF 方法相比，在行驶相同路径距离条件下，本文算法行进时间分别减少了 31% 和 42%，在同一路径且障碍物数量相同条件下本文算法障碍物碰撞率分别降低了 15% 和 31%。此外，本文算法在相同迭代次数条件下时间复杂度最小，算法性能最优。

2）试验结果表明，建立的点云图与实际测量尺寸最大误差为 2.1%，最小误差为 0.5%，满足巡检系统建图精度需求；机器人导航横向最小偏差为 4.5 cm，最大偏差为 7.2 cm，纵向最小偏差为 3.6 cm，最大偏差为 6.3 cm，航向最小偏差为 4.1°，最大偏差为 6.9°，满足养殖车间导航定位需求；检测的水体水温、溶解氧、酸碱度与人工检测结果一致，水质巡检系统可替代人工在养殖车间进行水质检测作业。

[参 考 文 献]

[1] PANIAGUA A, VEGA-RODRIGUEZ M A, FERRUZ J. Applying the MOVNS (multi-objective variable neighborhood search) algorithm to solve the path planning problem in mobile robotics[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 58(10): 20-35.

[2] PALMIERI L, RUDENKO A, ARRAS K O. A fast random walk approach to find diverse paths for robot navigation[J]. IEEE Robotics & Automation Letters, 2017, 2(1): 269-276.

[3] 黄懿, 梁放驰, 范成礼, 等. 带随机变异及感知因子的粒子群优化算法[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(2): 428-438.

HUANG Yi, LIANG Fangchi, FAN Chengli, et al. Particle

swarm optimization algorithm with random mutation and perception factors[J]. Journal of Northwest Polytechnical University, 2023, 41(2): 428-438. (in Chinese with English abstract)

[4] 朱金磊, 袁晓兵, 裴俊. 基于改进人工蜂群算法的灾害场景下路径规划[J]. 中国科学院大学学报, 2023, 40(3): 397-405.

ZHU Jinlei, YUAN Xiaobing, PEI Jun. Path planning in disaster scenarios based on improved artificial bee colony algorithm[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2023, 40(3): 397-405. (in Chinese with English abstract)

[5] SHAHRIARI M, BIGLARBEGIAN M. A new conflict resolution method for multiple mobile robots in cluttered environments with motion-liveness[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 48(1): 300-311.

[6] 肖献强, 程亚兵, 王家恩, 等. 轮式水质巡检系统路径跟踪控制方法研究[J]. 机械设计与制造, 2021(1): 256-262.

XIAO Xianqiang, CHENG Yabing, WANG Jiaen, et al. Research on path tracking control method for wheeled mobile robots[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2021(1): 256-262. (in Chinese with English abstract)

[7] 闫蓟平, 陆子龙, 李宝安. 基于测地线的无人船航路规划方法及存储介质: CN202211217757. 7 [P]. 2023-01-31.

[8] NI Y, ZHUO Q, LI N, et al. Characteristics and optimization strategies of A* algorithm and ant colony optimization in global path planning algorithm[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2023, 37(3): 2351006.

[9] MOHANTY P K, PARHI D R. A new real time path planning for mobile robot navigation using invasive weed optimization algorithm[C] Gas Turbine India Conference. American Society of Mechanical Engineers, New Delhi, India, 2014, 49644: V001T07A002.

[10] XUE D, WU D, YAMASHITA A S, et al. Proximal policy optimization with reciprocal velocity obstacle based collision avoidance path planning for multi-unmanned surface vehicles[J]. Ocean Engineering, 2023, 273: 114005.

[11] DONGDONG L, LEI W, JINGCAO C, et al. Research on path planning of mobile robot based on improved genetic algorithm[J]. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing, 2023, 14(6): 2341030.

[12] SAIFUL A, MOHAMAD S Z A, ZAHARUDDIN M, et al. Multi-objective path planner for an agricultural mobile robot in a virtual greenhouse environment [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157: 488-499.

[13] BURGARD W. Controlling synchro-drive robots with the dynamic window approach to collision avoidance [C] International Conference on Intelligent Robots & Systems. IEEE, Lausanne, Switzerland, 2002.

[14] 梁亚杰, 杨丽丽, 徐媛媛, 等. 不确定场景下无人农机多机动态路径规划方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 1-8.

LIANG Yajie, YANG Lili, Xu Yuanyuan, et al. Dynamic path planning method for multiple unmanned agricultural machines in uncertain scenarios[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(21): 1-8. (in Chinese with English abstract)

[15] YANG Y, LIN Z, YUE M, et al. Path planning of mobile robot with PSO-based APF and fuzzy-based DWA subject to moving obstacles[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2022, 44(1): 121-132.

[16] KRAMER O. Genetic Algorithms[M]. Springer International Publishing, 2017.

[17] GUO J, TAN F. Study on intelligent hybrid algorithm[C] International Conference on Electrical & Control Engineering. IEEE, Wuhan, China, 2010.

- [18] CHEN J, QIANG H, WU J, et al. Extracting the navigation path of a tomato-cucumber greenhouse robot based on a median point Hough transform[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 174: 105472.
- [19] LUCIANO C, FILIPPO B, DOMENICO L, et al. A small versatile electrical robot for autonomous spraying in agriculture[J]. *AgriEngineering*, 2019, 1(3): 391-402.
- [20] 孙国祥, 黄银锋, 汪小昆, 等. 基于LIO-SAM建图和激光视觉融合定位的温室自主行走系统[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(3): 227-239.
- SUN Guoxiang, HUANG Yinfeng, WANG Xiaochan, et al. Autonomous navigation system in a greenhouse using LIO-SAM mapping and laser vision fusion localization[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(3): 227-239. (in Chinese with English abstract)
- [21] 高金喆, 寇志伟, 孔哲, 等. 基于激光雷达的牧场巡检系统定位与建图算法设计[J]. *中国农机化学报*, 2024, 45(4): 222-230.
- GAO Jinzhe, KOU Zhiwei, KONG Zhe, et al. Design of location and mapping algorithm of pasture inspection robot based on LiDAR[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2024, 45(4): 222-230. (in Chinese with English abstract)
- [22] 罗征志, 韩怡可, 张鑫, 等. 改进RRT-Connect与DWA算法的巡检系统路径规划研究[J]. *计算机工程与应用*, 2024, 60(15): 344-354.
- LUO Zhengzhi, HANG Yike, ZHANG Xin, et al. Research on path planning of inspection robot with improved RRT-Connect and DWA algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2024, 60(15): 344-354. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张勤, 刘丰溥, 蒋先平, 等. 番茄采收机械臂运动规划方法与试验[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(9): 149-156.
- ZHANG Qin, LIU Fengpu, JIANG Xianping, et al. Motion planning method and experiments of tomato bunch harvesting manipulator[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(9): 149-156. (in Chinese with English abstract)
- [24] ZERMAS D, IZZAT I, PAPANIKOLOPOULOS N. Fast segmentation of 3D point clouds: A paradigm on LiDAR data for autonomous vehicle applications[C]. *International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, Singapore, 2017.
- [25] LI P, WANG J, ZHAO Y, et al. Improved algorithm for point cloud registration based on fast point feature histograms[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2016, 10(4): 045024.
- [26] 李秋洁, 丁旭东, 邓贤. 基于激光雷达的果园行间路径提取与导航[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S2): 344-350.
- LI Qiujie, DING Xudong, DENG Xian. Intra-row path extraction and navigation for orchards based on LiDAR[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(S2): 344-350. (in Chinese with English abstract)

Laser radar water quality inspection system for recirculating aquaculture workshop based on multi-objective genetic algorithm

TIAN Changfeng^{1,2}, CHE Xuan^{1,2}, ZHANG Chenglin^{1,2*}, ZHOU Yin¹, LI Xinfeng¹, LIU Andong¹

(1. *Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China*; 2. *Key Laboratory of Fishery Equipment and Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 200092, China*)

Abstract: With the expansion of the scale of the aquaculture workshop, the types and quantities of fish in the aquaculture pond have increased significantly, which is prone to water pollution or water quality changes, resulting in production safety accidents in the aquaculture workshop. The use of water quality inspection system for regular inspection of aquaculture ponds can not only reduce the labor intensity of aquaculture workers, but also detect abnormal water quality in aquaculture ponds in time and reduce economic losses. Due to the high humidity and poor lighting conditions in the recirculating aquaculture workshop, and the existence of a large number of aquaculture facilities and supporting aquaculture equipment, if a single target path planning method is adopted, it cannot meet the operational requirements of the water quality inspection system. To solve the above problems, this paper proposes a water quality inspection system based on three-dimensional lidar positioning technology. At the same time, a multi-objective genetic algorithm is used to solve the optimal inspection path of the robot considering five main factors, including safety, distance, stability, travel duration and collision-free path. And the feasibility of the water quality inspection system is verified by experiments. In the process of multi-objective genetic algorithm calculation, the number of path filling is first initialized; then, multiple objective functions are calculated to measure the fitness of individual paths, and the path satisfying the fitness criterion is selected as the optimal path of the water quality inspection system. The best individual is selected from the population with its probability by the tournament selection method, and then the two chromosomes are exchanged. The new offspring are generated by cyclic crossover, and then the adaptive bit mutation is performed to randomly exchange the input bit string. After executing the genetic operator, the fitness of the path is calculated and the fitness standard is checked. Repeat the above process until the specified conditions are met. Finally, the optimal path suitable for the movement of the water quality inspection system is selected. The experimental results show that the minimum lateral deviation of robot navigation is 4.5 cm, the maximum deviation is 7.2 cm, the minimum longitudinal deviation is 3.6 cm, the maximum deviation is 6.3 cm, the minimum heading deviation is 4.1°, and the maximum deviation is 6.9°, which meets the navigation and positioning requirements of the breeding workshop. The detected water temperature, dissolved oxygen, and pH were completely consistent with the manual detection results, indicating that the water quality inspection system was stable and could replace the manual detection of water quality in the aquaculture workshop. The simulation results based on multi-objective genetic algorithm show that compared with MOVNS and RCHF methods, the travel time of this algorithm is reduced by 31% and 42% respectively under the same driving path, and the obstacle collision rate is reduced by 15% and 31% respectively under the same path and number of obstacles. When selecting the path with the minimum time complexity in path planning, the performance of the proposed algorithm is more efficient and smoother. The research results can provide reference for the development of water quality inspection system in aquaculture workshop.

Keywords: robot; laser radar; path planning; multi-objective genetic algorithm; water quality inspection