doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.008

面向池塘养殖的水下海参原位计数无人船系统设计与试验

刘晓阳[1,2]　王文良[1,2]　郑欣宇[1,2]　陈佳颖[1,2]　陈启俊[3]　赵永刚[3]　林远山[1,4]

(1. 大连海洋大学信息工程学院, 大连 116023; 2. 大连市智慧渔业重点实验室, 大连 116023;
3. 大连鑫玉龙海洋生物种业科技股份有限公司, 大连 116007; 4. 大连海洋大学设施渔业教育部重点实验室, 大连 116023)

摘要: 针对现有水下海参观测和计数方法危险性高、成本高、效率低等问题,设计了一种海参原位计数无人船系统,用于水产养殖环境中的海参多目标跟踪与计数。系统采用分层设计,模块化架构提升了灵活性、稳定性和可维护性。硬件部分包括船体、水下感知系统和机载控制盒,通过转轴卡扣设计,实现无人船快拆与折叠,便于运输和安装。此外,系统集成了自主水下拍摄视频采集模块,并结合定高算法和轨迹跟踪算法,确保视频采集的稳定性和自主性。基于 YOLO v10 和 ByteTrack 的海参识别与计数算法,实现了快速、准确计数。试验结果表明,无人船和水下感知模块在 3 级风浪内表现稳定,俯仰角、翻滚角为 -18° ~ 18°。计数归一化平均绝对误差为 0.111 1,轨迹规划平均误差为 0.47 m,定高拍摄算法在 10 s 内收敛。实际养殖环境试验结果表明,该系统稳定可靠,可满足池塘养殖日常使用需求。

关键词: 海参原位计数无人船; 水下拍摄; 水产养殖; 多目标跟踪

中图分类号: S972　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)10-0082-12　　**OSID**:

Design and Testing of Unmanned Boat System for In-situ Counting of Sea Cucumbers in Pond Aquaculture

LIU Xiaoyang[1,2]　WANG Wenliang[1,2]　ZHENG Xinyu[1,2]　CHEN Jiaying[1,2]
CHEN Qijun[3]　ZHAO Yonggang[3]　LING Yuanshan[1,4]

(1. *School of Information Engineering, Dalian Ocean University, Dalian* 116023, *China*
2. *Dalian Key Laboratory of Smart Fisheries, Dalian* 116023, *China*
3. *Dalian Xinyulong Marine Biological Seed Industry Science and Technology Co., Ltd., Dalian* 116007, *China*
4. *Key Laboratory of Facilities Fisheries, Ministry of Education, Dalian Ocean University, Dalian* 116023, *China*)

Abstract: Aiming to address the issues of high risk, high cost, and low efficiency in existing underwater sea cucumber observation and counting methods, an autonomous unmanned surface vehicle (USV) system for sea cucumber multi-target tracking and counting in pond aquaculture environments was designed. The system adopted a hierarchical and modular architecture, enhancing flexibility, stability, and maintainability. The hardware included a hull, an underwater perception system, and an onboard control box, featuring a quick-release and foldable design with a swivel buckle mechanism for easy transportation and installation. Additionally, the system integrated an autonomous underwater video capture module, combined with altitude-holding and trajectory-tracking algorithms to ensure stable and autonomous video acquisition. A sea cucumber detection and counting algorithm based on YOLO v10 and ByteTrack enabled fast and accurate counting. Experimental results demonstrated that the USV and underwater perception module remained stable under Level 3 wind and waves, with a pitch angle range of -18° to 18°. The counting algorithm achieved a normalized mean absolute error (NMAE) of 0.111 1,

收稿日期: 2024-07-30　修回日期: 2024-08-23

基金项目: 辽宁省属本科高校基本科研业务费专项资金项目(2024JBZDZ004)、2023 中央财政对辽宁渔业补助项目、辽宁省重点研发计划项目(2023JH26/10200015)、辽宁省自然科学基金计划项目(2020-KF-12-09)、辽宁省教育厅基本科研项目(LJKZ0730、QL202016)、设施渔业教育部重点实验室开放课题(202219)、广西重点研发计划项目(桂科 AB23075150)和辽宁省应用基础计划项目(2022JH2/101300187)

作者简介: 刘晓阳(1998—),男,硕士生,主要从事海洋机器人研究,E-mail: liuxiaoyang0706@163.com

通信作者: 林远山(1982—),男,副教授,博士,主要从事机器视觉和机器学习研究,E-mail: linyuanshan@dlou.edu.cn

while the trajectory planning maintained an average error of 0.47 m. The altitude-holding algorithm converged within 10 s. Field tests in aquaculture environments confirmed that the system was stable and reliable, meeting the daily operational requirements of pond aquaculture.

Key words: USV for in-situ sea cucumber counting; underwater photography; aquaculture; multi-target tracking

0　引言

随着海洋牧场的建设和海水养殖业的飞速发展[1]，我国海参年产量已连续近 15 年稳居全球之首，成为海水养殖业不可或缺的重要组成部分[2]。近年来，利用现代信息技术和智能装备提升渔业生产力和水产资源利用率，推动了海洋智慧养殖的发展[3]。

海参养殖对生活环境要求极高，大面积死亡时有发生，因此定期观测水下养殖生物的生长状况尤为重要。目前海参观测依赖潜水员手持防水相机选取固定点进行抽样，但这种传统方式存在诸多局限性：人工成本高，存在人员安全隐患，并且对统计数量精度也有较大误差。国内外多项研究和应用致力于提升水下观测技术。现有的水下观测平台主要分为固定式[4-5]、半固定式[6]、手持杆式[7]、电缆式[8]。这些拍摄装置虽可以解决水下拍摄，但各自存在一些弊端。固定式观测平台受限于安装位置，无法灵活调整观测角度和范围，难以全面捕捉养殖区情况。半固定式和手持杆式设备在操作时需人工干预，仍存在人工成本高和潜水员安全风险的问题。电缆式设备虽能实现较大范围移动，但受限于电缆长度和灵活性，操作不便且易受水下环境复杂性的影响。此外，这些设备普遍存在维护难度大、易损坏、成本高等问题，导致其在大面积养殖区的推广应用受到限制。

随着人工智能的发展，遥控潜水器（ROV）的出现显著提升了水下拍摄能力和效果[9-10]，ROV 通常配备高清摄像头和灯光系统，能在深水和复杂环境中获得清晰影像，该技术的发展使得水下摄影变得更加安全和灵活。为进一步降低人工操作依赖，文献[11-12]致力于自主水下航行器（AUV）的控制研究，AUV 通常配备多种传感器，如声纳、摄像头和水下定位系统。在任务开始前，操作员可以预先设定 AUV 的航行路径和拍摄任务。AUV 接近目标区域后，其配备的摄像头开始捕捉视频或图像，这些图像保存在 AUV 内部存储设备中。尽管 ROV 和 AUV 在水下观测方面展现了诸多技术优势，但仍面临一些共同的挑战：①ROV 由于需要通过缆线与操作平台连接，灵活性受限，容易受到水流和障碍物的影响，操作困难且需专业技术人员，培训成本较高。AUV 虽然摆脱了缆线的束缚，具备较高的自主性和灵活性，但在复杂水下环境中的自主导航和避障能力仍面临挑战，特别是在狭窄养殖区内，容易碰撞或卡住。②AUV 维护和运行成本较高，电池续航时间有限，限制了其长时间、连续作业能力。③ROV 和 AUV 目前都缺乏通过检测算法[13-15]对海参进行快速、准确和稳定识别与计数[16-18]的能力。现有的图像处理技术和算法在复杂水下环境中表现不理想，受到光线变化、悬浮物干扰和海参隐蔽性等因素的影响，识别准确性不足。传统图像识别算法在处理海量数据时效率较低，难以实时处理和分析，导致识别和计数延迟。④ROV 和 AUV 只能在较近的海底区域进行有效拍摄，距离水底过低时会搅浑海底淤泥，影响成像效果。

本文设计一种专用于海参计数的养殖无人船系统。针对特定工作环境，采用模块化设计，设计无人船机械结构等。通过轨迹跟踪算法和定高算法，无人船能够将伸缩的水下拍摄装置精准送至指定水深处，进行水下视频采集，从而自主完成指定海参圈的水下视频采集任务。该系统集成海参识别计数算法，以期快速、准确和稳定地识别并计数海参。

1　总体方案设计

整个系统主要分为硬件部分和软件部分设计。在硬件层面，通过设计无人船机械结构，并搭载传感器进行数据感知与采集；同时，利用大功率无线硬件设备将数据传输回用户的软件层面。在软件部分，首先通过协议层整合和分类数据，然后在业务层对这些数据进行处理和分析。最后，为了使操作人员能够直观简单地操作系统，设计了人机交互模块。系统总体框图如图 1 所示。

1.1　水下视频采集模块

通过轨迹跟踪算法实现无人船在海参圈内自主巡航。利用声呐传感器发送声波信号测量与海床的距离，并通过人工设定一个最佳拍摄高度。利用定高算法实现升降装置的动态调节。所有视频数据通过建立的视频采集链路进行远程传输与保存。

1.2　人机交互模块

针对无人船系统功能，设计了便于养殖户操作

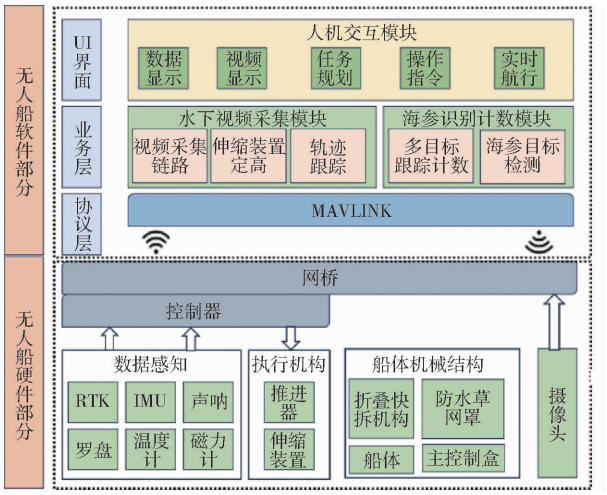


图 1 系统总体框图

Fig. 1 System over view diagram

的人机交互模块。系统通过简约的 UI 组件在主界面上显示关键信息,方便操作人员使用。为了实现无人船的自主航行和数据采集,设计了航线任务规划模块,操作员可以在地图上设置航线。在实时航行模块中,用户可以观看无人船采集的视频,并对海参分布情况和数量进行大致评估。为了辅助实际操控,设计了视频显示模块,可以同时显示 3 路视频,并支持视频保存功能,帮助操作员监视水下海参、障碍物以及周围环境的实时情况。

1.3 多目标跟踪海参识别计数模块

针对无人船采集的水下海参视频图像,进行预处理以提高图像质量,包括噪声去除、图像增强和颜色校正等操作。使用目标检测算法(如 YOLO v10)在图像中识别海参。应用多目标跟踪算法在连续帧中跟踪每一个检测到的海参,并进行计数,以帮助养殖户对海参圈中数量进行大致评估。

2 无人船机械结构设计

2.1 船体机械结构设计

海参养殖企业每年进行 2 次捕捞作业,分别在春季(4—5 月)和秋季(9—10 月)。在作业前会评估海参状态和数量,通常在 2 ~ 3 级风力的环境下进行作业。养殖企业通常管理 2 ~ 5 个海参圈,完成 1 个海参圈观测后需将设备移动到下一个海参圈进行作业。为了快速搬运系统,采用了模块化设计,船体结构设计为充气浮筒式,所有模块均支持快速拆卸和装配,以确保操作员运输和操作便捷性。无人船整体机械结构组成如图 2 所示。

2.1.1 水下感知系统

海参圈平均深度为 1.5 m,水下环境复杂,包含水草、礁石等。由于水质和摄像头焦距的限制,设计了一个通过升缩装置搭载的水下感知模块,用于采集水下视频。考虑到摄像头视野有限,为避免对前方障碍物躲避不及时,安装 2 个摄像头:1 个用于海参视频采集,另 1 个专门观察水下前方环境。摄像头固定结构采用多自由度转轴设计,可根据实际作业需求调节角度,以最佳角度拍摄水下视频。为获取高清水下视频供养殖企业作为参考,设计了一个前端固定结构搭载 GoPro 摄像头,可以根据养殖户具体需求调整角度,同时支持拍摄 4K 超清视频。为了满足采集海参圈深度数据和自主巡航时的升缩装置定高功能,还设计了可搭载声呐和深度传感器结构。整个水下感知系统采用流线型设计,以减少水下阻力。水下感知系统结构如图 3 所示。

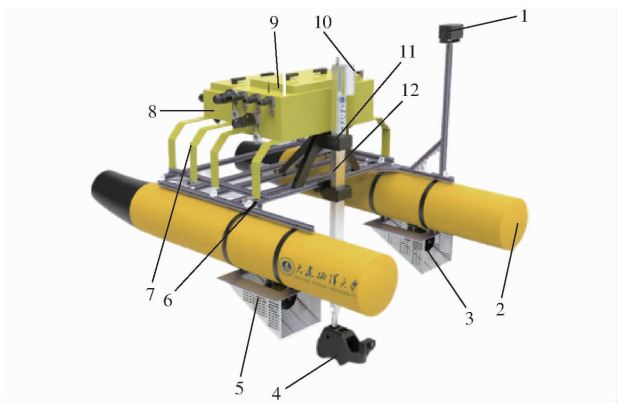


图 2 无人船整体机械组成

Fig. 2 Unmanned ship mechanical structure

1. 摄像头 2. TUP 充气浮体 3. 水下推进器 4. 水下感知系统 5. 防水草网罩 6、7. 船体支撑架 8. 控制盒 9、10. 天线 11. 折叠快拆机构 12. 升缩装置

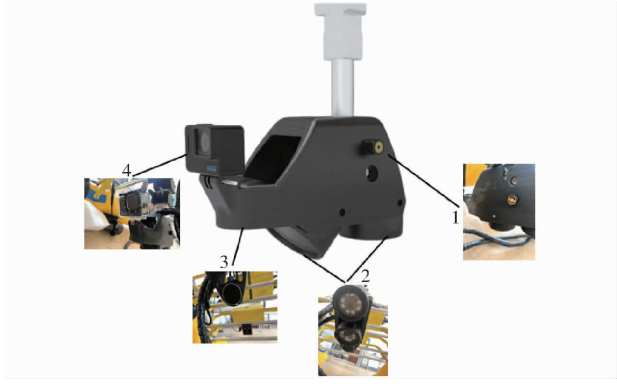


图 3 水下感知系统结构示意图

Fig. 3 Schematic of underwater perception system structure

1. MS5837 型深度传感器 2. 摄像头 3. 声呐 4. GoPro 摄像头

2.1.2 折叠快拆机构

升缩装置和水下感知模块总质量约为 7.5 kg。为确保与船体紧密固定,设计了一个主体框架,采用三角形支撑结构。为方便人员装车运输,还设计了一个转轴卡扣套件。该套件使得在运输过程中,无需借助任何工具,就能将升缩装置从垂直状态转变为水平状态,从而节省空间。折叠快拆机构如图 4

所示。

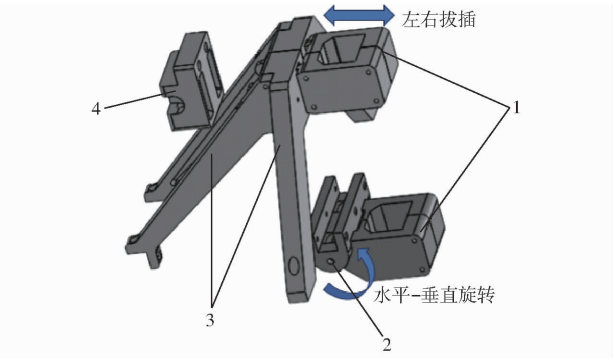


图 4　折叠快拆机构结构示意图

Fig. 4　Folding quick-release structure

1. 升缩装置固定套　2. 转轴　3. 支撑架　4. 折叠固定套

2.1.3　防水草网罩

实际使用中，海参圈水下复杂，有些区域水草众多。很多情况下无人船在航行过程中推进器会缠绕水草失去动力。由于无人船大多情况都是以船头方向前航行，实际航行中发现水草都是通过推进器前部开始缠绕，所以在设计防水草网罩时尾部不进行遮挡，这样既不影响推力也可减轻整个无人船质量。防水草网罩如图 5 所示。

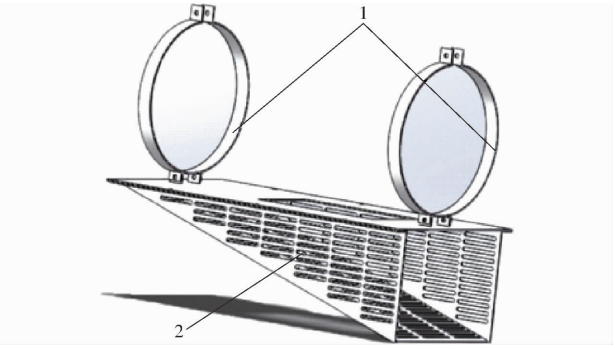


图 5　防水草网罩结构示意图

Fig. 5　Waterproof weed screen assembly

1. 船体固定套环　2. 防水草排水板

2.1.4　主机控制盒

考虑到不同使用场景需求，设计了 1 个灵活的无人船系统，主要包括 2 个快拆控制盒：1 个为电池盒，为整个系统提供能源；另 1 个为主控制盒。这 2 个控制盒可以随时更换和移植。控制盒内部结构如图 6 所示。为确保系统稳定性和抗干扰能力，配备发射频率 2.4 GHz 接收机，负责将控制器采集的传感器数据实时回传到遥控器端，以便实时监测系统状态并调整必要参数。考虑到整个系统质量较大，选择 200 W、80 A 水下推进器和电调，无人船最大航速可达到 5 m/s，最大负载能力为 40 kg。通过控制器发送 PWM 信号，可以精确控制 2 个水下推进器，并实时回传推进器的状态信息至控制器。为确保无人船能精准沿着预定路线航行，采用高精度 RTK 定位设备，选择双天线 C－RTK 2HP，其定位精度为 0.5 m，最大搜星能力超过 50 颗，定位时间小于 5 s。考虑到工作地点常在信号较弱的岛屿区域，无法依赖 4G 信号进行数据传输，采用大功率网桥解决方案，通讯距离可达 3 km，以满足日常作业需求。

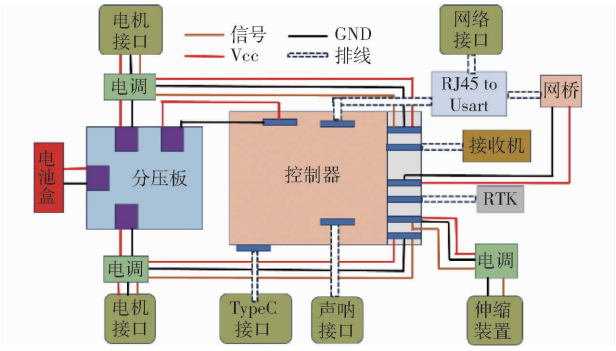


图 6　主机控制盒内部示意图

Fig. 6　Internal schematic of control box

3　水下视频采集模块设计

3.1　数据采集总体思路

数据采集总体链路如图 7 所示，主要分为 3 部分：①无人船作为移动端，装载摄像头和传感器负责实时数据采集。②通过频率 5.8 GHz 的网桥信号传输数据，该频率信号传输范围广，能承载大量数据流。③岸边设置基站负责接收来自移动端信号，包括视频、高度计和深度传感器数据等。接收的原始数据通过人机交互软件进行解析，并在软件界面上显示。采集的原始视频存储在服务器端，服务器部署目标检测算法对视频进行识别和计数。用户可以根据检测到的数量结果，对海参圈中的海参进行初步评估，以便制定合理的采集和补充计划。

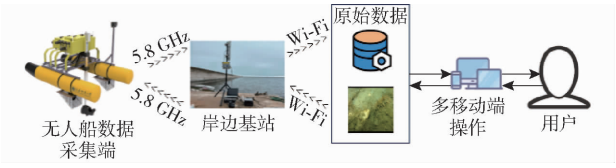


图 7　数据采集总体链路

Fig. 7　Data acquisition overall link

3.2　定高功能

为采集清晰的水下视频，应使升缩装置保持某一特定高度垂直向下拍摄，所以需要声呐不停向水下发送声波脉冲，当声波碰到水下物体时，会有部分声波反射回来并被接收器捕捉到。根据声波发射与接收的时间差，可以计算出海床高度。再利用 PID 控制算法动态输出 PWM 信号实现升缩杆定高功能。

PID 基本控制器根据当前误差和过去误差计算控制输出，数学表达式为

$$u(t)=K_p e(t)+K_i\int_0^t e(t)\,\mathrm{d}t+K_d\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中 $u(t)$——控制器输出

$e(t)$——目标高度和当前高度差

K_p——比例增益

K_i——积分增益

K_d——微分增益

定义目标高度为 h_{target}，当前高度为 h_{current}，控制输出采样时间 Δt。计算目标高度与实际高度的误差：$e(t)=h_{\text{target}}-h_{\text{current}}$。积分误差和微分误差为

$$\int_0^t e(t)\,\mathrm{d}t\approx\sum_{i=0}^{n}e(i)\Delta t \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}\approx\frac{e(t)-e(t-1)}{\Delta t} \tag{3}$$

最后计算输出控制为

$$u(t)=K_p e(t)+K_i\sum_{i=0}^{n}e(i)\Delta t+K_d\frac{e(t)-e(t-1)}{\Delta t} \tag{4}$$

3.3 轨迹跟踪

轨迹跟踪主要实现思想本质是串级 PID，整个控制器输入为目标位置和速度，输出为推力。主要分为内外环控制，外环根据位置信息反馈不断纠正位置，内环根据速度和航向角度及时纠正偏航运动，直到到达目标位置。轨迹跟踪控制系统结构如图 8 所示。

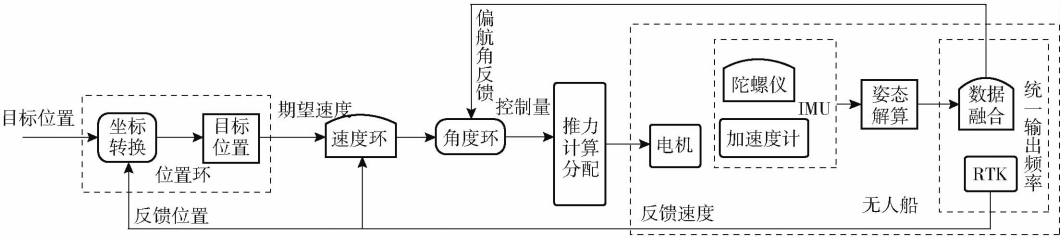


图 8 轨迹跟踪控制系统结构框图

Fig. 8 Block diagram of trajectory tracking control system

3.3.1 坐标转换

航点规划首先要有精确的定位，系统定位采用双天线 RTK 设备，输出经纬度信息，然而经纬度是球面坐标系中的坐标，但航点规划算法更适合在平面坐标系中进行。取系统第 1 次上电经纬度为坐标原点，建立 *ENU* 坐标系。假设参考点坐标为经度 λ_0、纬度 ϕ_0、高度 h_0，此系统当前地理位置坐标为经度 λ、纬度 ϕ、高度 h。再将地理坐标（经纬度和高度）转换为地心地固坐标系坐标（*ECEF*）。*ECEF* 坐标为

$$\begin{cases}X=(N(\phi)+h)\cos\phi\cos\lambda\\ Y=(N(\phi)+h)\cos\phi\sin\lambda\\ Z=[(1-e^2)N(\phi)+h]\sin\phi\end{cases} \tag{5}$$

式中 $e^2=2f-f^2$，$N(\phi)=\dfrac{a}{\sqrt{1-e^2\sin^2\phi}}$，$a=6\,378\,137.0$ m，$f=\dfrac{1}{298.257\,223\,563}$，得到 *ECEF* 坐标 (X_0,Y_0,Z_0)，最后将 *ECEF* 坐标转换为 *ENU* 坐标。首先计算系统当前位置的 *ECEF* 坐标 (X,Y,Z)，再计算 *ECEF* 坐标差值，计算式为

$$\begin{cases}\Delta X=X-X_0\\ \Delta Y=Y-Y_0\\ \Delta Z=Z-Z_0\end{cases} \tag{6}$$

使用参考点经纬度，构建 *ECEF* 到 *ENU* 的旋转矩阵，公式为

$$\begin{bmatrix}x_{east}\\ y_{north}\\ z_{up}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\sin\lambda_0 & \cos\lambda_0 & 0\\ -\sin\phi_0\cos\lambda_0 & -\sin\phi_0\sin\lambda_0 & \cos\phi_0\\ \cos\phi_0\cos\lambda_0 & \cos\phi_0\sin\lambda_0 & \sin\phi_0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta X\\ \Delta Y\\ \Delta Z\end{bmatrix} \tag{7}$$

将差值代入式（7），计算得 *ENU* 坐标（x_{east}，y_{north}，z_{up}）。

3.3.2 差速无人船动力学模型

（1）船体坐标系和地面坐标系

设船体坐标系 O_b 固定在船体上，x 轴指向船头，y 轴指向船左侧，z 轴指向船底。设地面坐标系 O_e 固定在地面上，x 轴指向正东方向，y 轴指向正北方向，z 轴指向天空。

（2）运动状态描述

设船体在地面坐标系中的位置为 (x,y,θ)，其中 (x,y) 为船体质心位置，θ 为船体航向角。船体在船体坐标系中的速度为 (u,v,r)，其中 u 为前向速度，v 为侧向速度，r 为角速度。

（3）运动方程

无人船运动状态可以由位置更新、速度更新动力学方程描述。

位置更新方程为

$$\begin{cases}\dot{x}=u\cos\theta-v\sin\theta\\ \dot{y}=u\sin\theta+v\cos\theta\\ \dot{\theta}=r\end{cases} \tag{8}$$

速度更新方程为

$$\begin{cases}m(\dot{u}-vr)=F_x-X_u u\\ m(\dot{v}+ur)=F_y-Y_v v\\ I_z\dot{r}=N_r r+(T_r-T_l)d\end{cases} \tag{9}$$

式中 m——船体质量

I_z——船体绕 z 轴转动惯量

F_x——船体在 x 轴上外力

F_y——船体在 y 轴上外力

X_u、Y_v——速度阻尼系数

N_r——转动阻尼系数

T_l——左侧推进器推力

T_r——右侧推进器推力

d——推进器与船体中心横向距离

3.3.3　差速驱动推力计算

(1)推力计算

推力计算式为

$$\begin{cases} T_r = K_r \omega_r \\ T_l = K_l \omega_l \end{cases} \tag{10}$$

式中　K_r、K_l——推进器的推力系数

ω_r、ω_l——右侧和左侧推进器角速度

(2)控制输入

差速控制方式通过调节左右推进器的转速差控制船体的航向和速度。设角速度差 $\Delta\omega = \omega_r - \omega_l$，平均角速度 $\overline{\omega} = (\omega_r + \omega_l)/2$，则船体线速度和角速度可表示为

$$\begin{cases} u = K\overline{\omega} \\ r = K_d \Delta\omega \end{cases} \tag{11}$$

式中　K——推进器平均角速度与船体前向速度间的传动比系数

K_d——推进器角速度差与船体角速度之间的差速增益系数

4　基于多目标跟踪的海参计数模块设计

为实现对无人船采集的海参视频进行计数，采用 YOLO v10 + ByteTrack 为基础方法，该方法结合 YOLO v10 的目标检测能力和 ByteTrack 的轨迹跟踪能力，可以实现对海参快速、准确和稳定地识别和计数。

4.1　海参目标检测

随着计算机视觉和深度学习的发展，YOLO 系列算法在精度和速度方面取得显著平衡，广泛受到认可。因此，选用 YOLO 系列 YOLO v10 作为检测器基础算法，网络结构如图 9 所示。

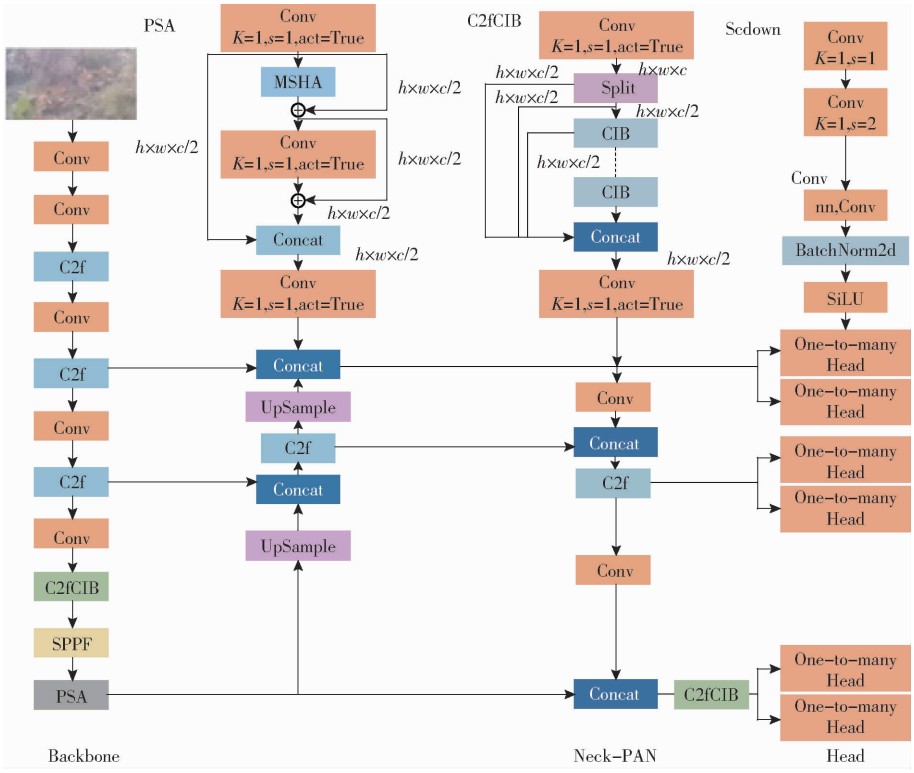


图 9　YOLO v10 网络结构图

Fig. 9　Architecture of YOLO v10 network

YOLO v10 主要由 Backbone(骨干网络)、Neck(连接层)和 Head(检测头)3 部分组成。Backbone 采用轻量化的分类头(Lightweight classification head)以减少计算成本，并使用空间-通道解耦下采样(Spatial-channel decoupled downsampling)技术进行更高效的下采样。通过在深层使用大核卷积(Large-kernel convolution)，扩大感受野和提高模型表征能力。Neck 部分结合多个特征融合模块(如 Path aggregation network，PAN)以增强多尺度特征的融合能力，并在较低分辨率阶段引入部分自注意力模块(Partial self-attention module，PSA)进行全局特征建模，提升特征的全局表示能力。Head 部分采

用双重标签分配策略(Dual label assignments)以实现无 NMS 训练,提升推理效率;一致的匹配度量(Consistent matching metric)确保一对多和一对一分配头部的一致性,轻量化设计的分类头和回归头则用于高效的分类和定位。

4.2 海参多目标跟踪计数

海参计数是一种基于视频分析的方法,用于估计海参数量和密度。海参计数的主要难点在于海参的形状不规则,颜色与背景相近,且存在遮挡和重叠等问题。为了解决这些问题,采用多目标跟踪算法和过线计数方法。多目标跟踪算法是一种利用检测结果跟踪视频中多个目标的方法,能够生成每个目标轨迹,并消除重复计数风险。过线计数方法是一种在视频中设置虚拟线条,统计通过线条的目标数量方法,能够提供每帧或每段时间内的海参数量。结合这两个方法,可以得到视频中海参总数和平均密度。

(1)ByteTrack 算法基本流程

基本的 ByteTrack 多目标跟踪算法采用 byte 数据关联策略,该策略能够较好地跟踪养殖场景下的海参对象,其具体运行过程如下:ByteTrack 首先根据检测框的置信度将其分为高分框(D_{high})和低分框(D_{low})。其次,通过卡尔曼滤波器预测轨迹位置,计算高分框和轨迹集合(T_{track})间的 IoU(交并比)距离矩阵,并使用匈牙利算法进行匹配。对于未匹配的轨迹和低分框(D_{low}),同样计算 IoU 距离并进行 2 次匹配,以恢复被遮挡或模糊的目标。最后,对未匹配的高分框创建新轨迹,删除长时间未匹配轨迹,并合并重叠轨迹,以确保每个目标准确跟踪。

(2)过线计数方法

为提升不同环境下的计数效果,结合实际应用场景和跟踪算法易出现的 ID 频繁切换特点,提出了过线计数方案,在视频图像高度一半处设置了 1 个水平检测线 L 和 1 个记录已过线 ID 的集合 D_{lc},在 D_{lc} 使用 Byte 算法获得的每帧检测框的 ID 进行过线判断,过线计数流程图如图 10 所示。

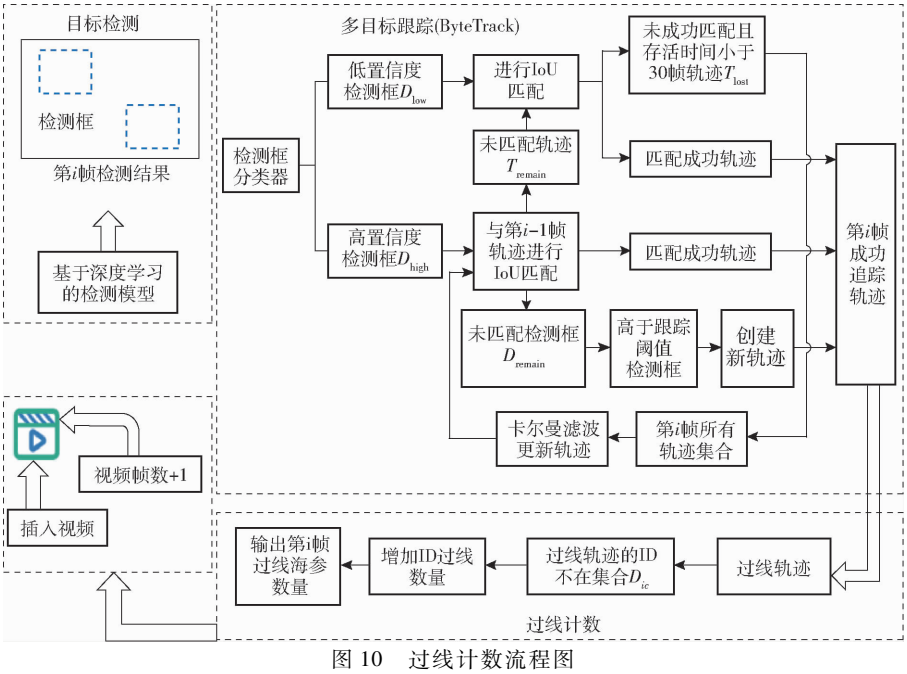


图 10 过线计数流程图

Fig. 10 Line-crossing counting flowchart

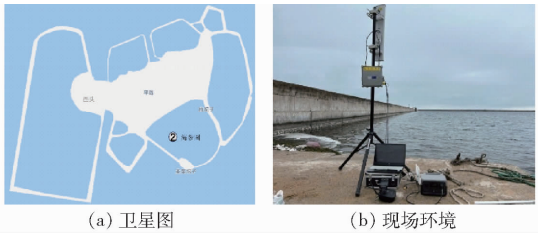
5 试验结果与分析

5.1 试验设置

测试场地在辽宁省大连市普兰店区,大连鑫玉龙海洋生物种业科技股份有限公司的 2 号海参圈,现场卫星图如图 11a 所示,基站架设在海参圈岸边,现场环境如图 11b 所示。当天气温为 16℃,风力 2~3 级西南风。最终设计系统实物如图 12 所示。

5.1.1 船体稳定性测试

无人船质量为 30 kg,考虑到风浪、转弯产生的力对船体支撑架产生形变问题,支撑架采用



(a) 卫星图 (b) 现场环境

图 11 现场卫星图

Fig. 11 Site satellite image

20 mm×20 mm 铝结构,在垂直夹角处运用角铝做三角支撑。实际工作中由于无人船航行方向不一样,会受到顺风、逆风、侧风的影响。为测试其稳定



图 12　系统现场工作

Fig. 12　On-site system operation

性，设定一个矩形航线，对其每个方向的翻滚角、俯仰角进行分析。设定稳定性测试轨迹如图 13 所示。

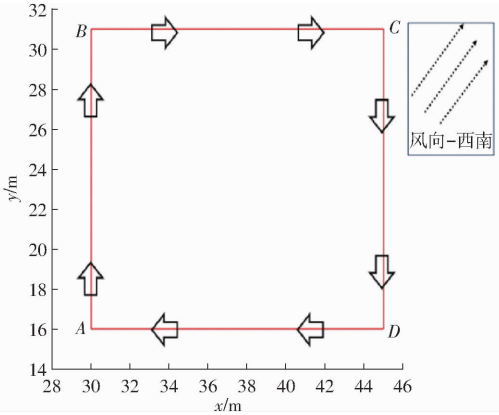


图 13　稳定测试轨迹

Fig. 13　Stability test trajectory diagram

在 3 级西南风环境下，经过 4 个方向测试，4 个方向偏航角与俯仰角均为 -18° ~ 18°。船体稳定性符合设计需求，能满足日作业要求。每个方向偏航角变化如图 14 所示。最大、最小偏航角如表 1 所示。

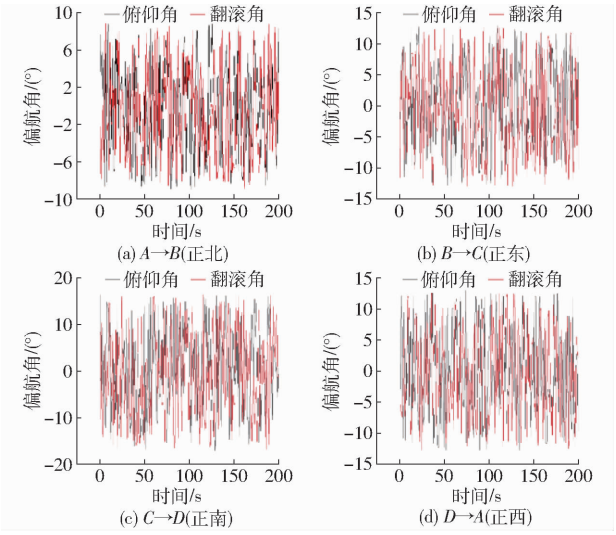


图 14　俯仰角和翻滚角变化曲线

Fig. 14　Variation curves of pitch angle and roll angle

5.1.2　水下推进器性能测试

水下推进器在功率和转速一定情况下，正转推力比反转推力效果好，正向最大输出功率为 200 W，而反向只有 160 W。实际测试表明推进器可使无人船最大以速度 5 m/s 航行。推进器性能测试如图 15 所示。

表 1　最大、最小俯仰角、翻滚角

Tab. 1　Maximum and minimum values of pitch and roll angles　(°)

方向	最大俯仰角	最小俯仰角	最大翻滚角	最小翻滚角
正北	8.82	-8.90	8.86	-8.83
正东	12.87	-11.00	12.84	-12.94
正南	16.36	-15.00	16.48	-17.75
正西	12.92	-11.79	12.10	-11.97

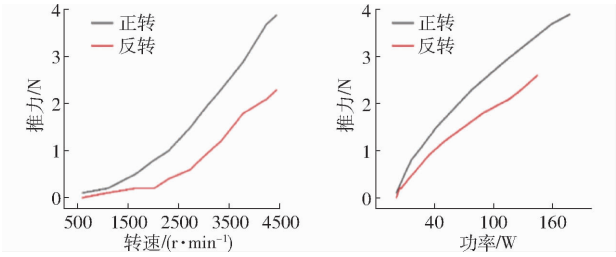


图 15　水下推进器转速-推力和功率-推力关系曲线

Fig. 15　Speed - thrust and power - thrust characteristics of underwater thruster

5.1.3　轨迹跟踪

为保证无人船能在海参圈沿着既定路线采集海参视频，首先测试轨迹跟踪功能，通过开发的安卓 APP 在 3 号海参圈分别规划“几”和“三角形”字形 2 组轨迹，轨迹路线如图 16 所示。通过试验数据曲线可以看出设定轨迹与实际轨迹虽有误差，但整体可以沿着路线精准航行。以“三角形”轨迹为例，在

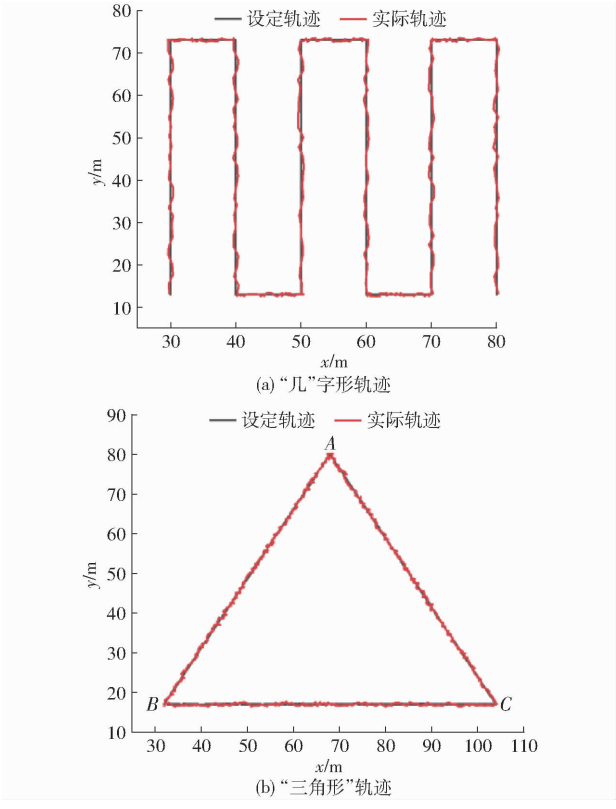


图 16　设定轨迹与真实轨迹曲线

Fig. 16　Set course *vs* actual course curves

设定轨迹取 3 个点可以求得直线 AB、AC、BC 函数表达式。在实际航行轨迹上随机取 400 个点，求得平均误差为 0.47 m。

5.1.4 定高拍摄功能测试

海参圈深度不一样，想要拍摄清晰的海参视频需使水下感知模块能稳定保持在海底特定高度，经过实际测试发现人工手动控制升缩装置，保持在距海底 0.8 m 时所拍摄画面清晰。

(1)声呐校准与定高功能验证

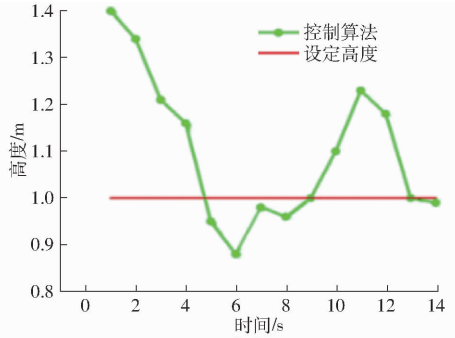
实验室搭建水池，水深为 1.42 m，声呐随机垂直放入水池某一高度保持不动，通过卷尺测量方法与声呐传感器测试进行对比试验，如图 17 所示。两种方式测量时与水底距离均为 0.82 m，声呐传感器获得高度数据准确，可作为升缩装置定高功能数据使用。



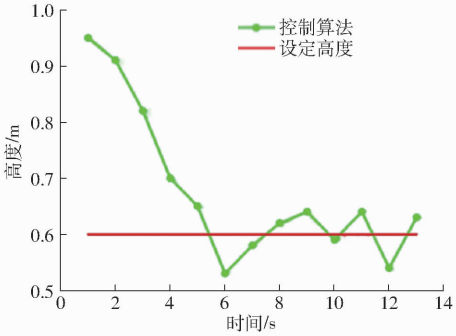
图 17 声呐校准试验

Fig. 17 Calibration experiment of sonar system

通过 PID 控制算法，设定 2 个高度 1.0、0.6 m，升缩装置 10 s 左右开始收敛到达设定高度。定高试验结果如图 18 所示。



(a) 定高1.0 m



(b) 定高0.6 m

图 18 不同设定高度下试验结果

Fig. 18 Height-dependent experimental results

5.1.5 人机交互模块

考虑到养殖户实用性问题，在设计人机交互模块时，界面设计简单易操作。所有关键数据均放在主界面，如水下视频、无人船电量、水质数据、声呐距离等。可通过人机交互模块实时监控无人船状态，调用高德 API 进行轨迹规划，使无人船可以自主航行采集数据，无需养殖户操作。所有数据均保存在手机文件夹下，便于后期养殖户分析。人机交互模块界面如图 19 所示。

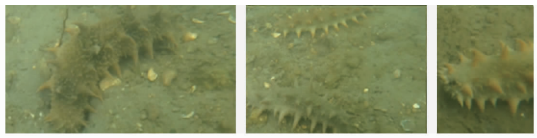


图 19 人机交互模块界面

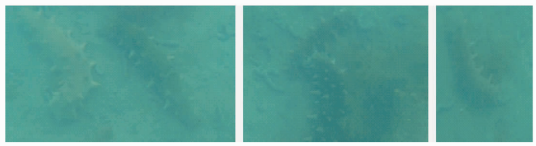
Fig. 19 Human-computer interaction platform interface

5.1.6 原始视频采集

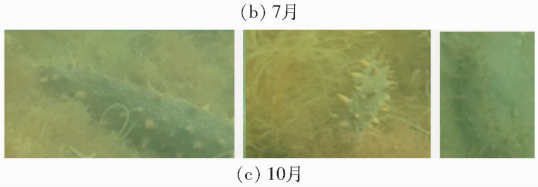
采集图像的清晰度主要取决于现场光线、水质状况。1—6 月以及 9—12 月期间，由于温度适宜，海参圈水质通常较为清澈。然而，7、8 月的高温导致水中藻类增多。此外，养殖企业也会在海参圈中投放药剂，以减少透光度，防止水温过高影响海参生长，因此这段时间水质相对浑浊。根据现场天气情况在 3 个不同时间段内随机选择一天，在 2 号圈海参密集且水下环境相对简单的区域进行采集测试。操作员在上位机上规划“几”字形路线，并将拍摄高度设置为 0.8 m。图像采集效果如图 20 所示。



(a) 4月



(b) 7月



(c) 10月

图 20 采集海参图像

Fig. 20 Sea cucumber image acquisition

5.2 海参计数功能测试

5.2.1 检测性能

使用 YOLO v10 在海参计数数据集上进行训

练，并在制作的测试集上进行测试，利用目标检测评估指标精确率（Precision）、召回率（Recall）、平均检测精度（Average precision，AP）、平均检测精度均值（mAP）、参数量（Params）进行精度检验，结果如表 2 所示。

表 2　目标检测模型结果

Tab. 2　Target detection model results

参数	精确率/%	召回率/%	mAP50/%	mAP50－95/%	参数量
数值	98.9	98.6	99.5	87.9	2.69×10^6

5.2.2　跟踪计数性能

为验证本文算法计数效果，使用 3 个视频进行数据标注测试，并制作基准真实值评估算法准确性。针对跟踪算法评估，采用多目标跟踪准确率（MOTA）和身份识别 F1 分数（IDF1）进行数据化表现，以及使用归一化平均绝对误差（nMAE）对跟踪结果进行量化评估。IDF1 用于评估多目标追踪算法在身份保持方面性能。计算公式为

$$IDF1=\frac{2IDTP}{2IDTP+IDFP+IDFN}\times100\% \tag{12}$$

$$MOTA=1-\frac{\sum_t FN_t+FP_t+IDSw_t}{\sum_t GT_t} \tag{13}$$

式中　$IDTP$——正确标识的检测数

$IDFP$——错误标识的检测数

$IDFN$——正确标识的错检测数

FN_t——漏检数量

FP_t——误检数量

$IDSw_t$——时间 t 跟踪期间的 ID 切换次数

NMAE 通过对所有视频中模型预测值与真实值间的绝对误差进行平均，并将该平均值归一化到真实值平均值进行计算，计算公式为

$$NMAE=\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i-\hat{y}_i|}{\bar{y}} \tag{14}$$

式中　y_i——视频 i 真实值

$\hat{y}_i$——视频 i 预测值

$\bar{y}$——所有真实值平均值

n——视频数量

2 种计数方法海参数量统计结果如表 3 所示。

表 3　2 种计数方法海参数量统计结果

Tab. 3　Sea cucumber count results using two counting methods

方法	视频 1			视频 2			视频 3			归一化平均绝对误差
	计数结果	IDF1/%	MOTA/%	计数结果	IDF1/%	MOTA/%	计数结果	IDF1/%	MOTA/%	
真实值	45			42			48			
YOLO v10 + ByteTrack	81	59.2	37.8	72	67.8	52.1	79	77.8	62.9	0.718 5
本文方法	42	78.1	59.8	36	77.5	59.2	42	83.9	70.8	0.111 1

由表 3 可知，本文方法与 YOLO v10 + ByteTrack 基线方法相比，在 3 个测试视频中均表现出更优性能。在计数准确性方面，本文方法 NMAE 为 0.111 1，较基线方法的 0.718 5 显著降低 84.5%。在跟踪性能方面，本文方法的 IDF1 平均提升 12.3%，MOTA 在视频 1 和视频 3 中分别提高 22.0% 和 7.9%。试验结果表明，本文方法在提升海参计数精度和目标跟踪稳定性方面具有显著优势。

实际养殖环境结果表明，该系统稳定可靠，可满足池塘养殖日常使用需求。但实际使用过程中存在一些不足与值得注意的地方。模块化设计的船体存在多处拼装结构连接处，因此在整个使用周期中需定期检查和维护这些连接，防止松动和海水侵蚀。在炎热的夏季，由于船体框架采用铝制结构，主控舱内部温度容易升高，多个元器件长时间运行会导致过热，影响船体性能。因此，高温天气下作业时间不宜过长。在现场作业中，由于水下环境复杂，存在礁石等障碍物，目前避障主要依靠操作员通过前置摄像头观察水下画面来进行。未来的研究将致力于开发一种无人船水下避障算法，以实现自主避障功能。

6　结论

（1）设计的无人船结构、折叠快拆结构及水下感知模块在实际应用中表现稳定可靠，满足池塘海参养殖的日常使用需求，并能在手动和自动模式间自由切换，保障系统安全性。

（2）基于轨迹跟踪和定高算法的无人船系统，实现了精准航行并成功采集水下海参图像，轨迹跟踪平均误差仅为 0.47 m。开发的人机交互模块简洁易用，性能稳定。海参检测、跟踪及计数方法，有效帮助养殖企业评估海参圈内的海参数量和位置。

参　考　文　献

[1]　杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望[J]. 水产学报，2016，40(7)：1133－1140.

YANG Hongsheng. Construction of marine ranching in China: retrospect and prospect[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(7): 1133 - 1140. (in Chinese)
[2] 王炫凯,曲宝成.我国海参养殖资源现状及面临问题研究综述[J].水产养殖,2021,42(4):74 - 75.
[3] 李道亮,刘畅.人工智能在水产养殖中研究应用分析与未来展望[J].智慧农业(中英文),2020,2(3):1 - 20.
LI Daoliang, LIU Chang. Research applications and future prospects of artificial intelligence in aquaculture[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(3): 1 - 20. (in Chinese)
[4] TROBBIANI G A, VENERUS L A. A novel method to obtain accurate length estimates of carnivorous reef fishes from a single video camera[J]. Neotropical Ichthyology, 2015, 13(1): 93 - 102.
[5] DORMAN S R, HARVEY E S, NEWMAN S J. Bait effects in sampling coral reef fish assemblages with Stereo-BRUVs[J]. PLoS One, 2012, 7(7): e41538.
[6] 田鲁军,吴孟轩,贾鹏,等.水下视频监控系统光场分布与成像效果研究[J].石油矿场机械,2024,53(2):19 - 25.
TIAN Lujun, WU Mengxuan, JIA Peng, et al. Study on light field distribution and imaging performance of underwater video surveillance systems[J]. Oil Field Equipment, 2024, 53(2): 19 - 25. (in Chinese)
[7] 车彦翩,刘畅,盛智彬,等.用于浅水养殖的低可视度水下摄像系统研究[J].渔业现代化,2020,47(5):15 - 22.
CHE Yanhe, LIU Chang, SHENG Zhibin, et al. Research on low-visibility underwater camera system for shallow-water aquaculture[J]. Fishery Modernization, 2020, 47(5): 15 - 22. (in Chinese)
[8] 徐鹏飞,陈梅雅,开艳,等.大型水电站坝体检测水下机器人研究进展[J].清华大学学报(自然科学版),2023,63(7):1032 - 1040.
XU Pengfei, CHEN Meiya, KAI Yan, et al. Research progress on remotely operated vehicle technology for underwater inspection of large hydropower stations[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2023, 63(7): 1032 - 1040. (in Chinese)
[9] 孙功武,苏义鑫,毛英,等.基于模糊逻辑的混合推进 ROV 多级推力分配策略[J].机器人,2023,45(4):472 - 482.
SUN Gongwu, SU Yixin, MAO Ying, et al. Fuzzy logic-based multi-stage thrust allocation strategy for hybrid propulsion ROVs[J]. Robot, 2023, 45(4): 472 - 482. (in Chinese)
[10] 黄兆军,曾明如.小型无人有缆遥控水下机器人智能控制方法[J].实验室研究与探索,2024,43(7):34 - 38,53.
HUANG Zhaojun, ZENG Mingru. Intelligent control methods for small tethered remotely operated underwater vehicles[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2024, 43(7): 34 - 38,53. (in Chinese)
[11] 黄浩乾,郑康健,马惊天.基于模型预测的 AUV 轨迹跟踪滑模控制方法[J].中国惯性技术学报,2024, 32(2): 205 - 212.
HUANG Haoqian, ZHENG Kangjian, MA Jingtian. Model predictive-based sliding mode control method for AUV trajectory tracking[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2024, 32(2): 205 - 212. (in Chinese)
[12] 徐鹏,徐东,李腾涛,等.基于 COMGRU 的 AUV 航路轨迹预测方法[J].哈尔滨工程大学学报,2024,45(7):1384 - 1390.
XU Peng, XU Dong, LI Tengtao, et al. COMGRU-based route trajectory prediction method for AUVs[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(7): 1384 - 1390. (in Chinese)
[13] 王金鹏,何萌,甄乾广,等.基于改进 COF - YOLO v8n 的油茶果静态与动态检测计数方法[J].农业机械学报,2024, 55(4):193 - 203.
WANG Jinpeng, HE Meng, ZHEN Qianguang, et al. *Camellia oleifera* fruits static and dynamic detection counting based on improved COF - YOLO v8n[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 193 - 203. (in Chinese)
[14] 王玲,张旗,冯天赐,等.基于 YOLO v7 - ST 模型的小麦籽粒计数方法研究[J].农业机械学报,2023,54(10):188 - 197,204.
WANG Ling, ZHANG Qi, FENG Tianci, et al. Wheat grain counting method based on YOLO v7 - ST model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 188 - 197,204. (in Chinese)
[15] 鲍文霞,谢文杰,胡根生,等.基于 TPH - YOLO 的无人机图像麦穗计数方法[J].农业工程学报,2023,39(1):155 - 161.
BAO Wenxia, XIE Wenjie, HU Gensheng, et al. Wheat ear counting method from UAV images based on TPH - YOLO[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(1): 155 - 161. (in Chinese)
[16] 范松伟,林翔瑜,周平.基于改进的卷积神经网络的虾苗自动计数研究[J].渔业现代化,2020,47(6):35 - 41.
FAN Songwei, LIN Xiangyu, ZHOU Ping. Automatic shrimp fry counting using improved convolutional neural network[J]. Fishery Modernization, 2020, 47(6): 35 - 41. (in Chinese)
[17] 安志强,李智军,刘硕,等.融合 YOLOv7 和 BYTE 多目标跟踪的多类别海珍品计数方法[J].农业工程学报,2023, 39(9):183 - 189.
AN Zhiqiang, LI Zhijun, LIU Shuo, et al. Multi-category seafood counting method by integrating YOLOv7 and BYTE multi-object tracking[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(9): 183 - 189. (in Chinese)
[18] 张璐,黄琳,李备备,等.基于多尺度融合与无锚点 YOLOv3 的鱼群计数方法[J].农业机械学报,2021,52(增刊):237 - 244.
ZHANG Lu, HUANG Lin, LI Beibei, et al. Fish population counting method based on multi-scale fusion and anchor-free YOLOv3[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 237 - 244. (in Chinese)
[19] 宁君,马一帆,李伟,等.带有状态/输入量化的无人船自适应模糊跟踪控制[J].华南理工大学学报(自然科学版), 2024,52(5):52 - 61.
NING Jun, MA Yifan, LI Wei, et al. Adaptive fuzzy tracking control for unmanned surface vessels with state/input quantization[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(5): 52 - 61. (in

Chinese)
[20] 于特,刘佳鹏,吴超,等.基于非线性干扰观测器的无人船与自主水下航行器协同运动控制策略[J].上海交通大学学报,2023,57(增刊1):114-123.
YU Te, LIU Jiapeng, WU Chao, et al. Cooperative motion control strategy for USV and AUV based on nonlinear disturbance observer[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(Supp.1): 114-123. (in Chinese)
[21] 周寅飞,张立华,贾帅东,等.最大可航窗口序列约束贝塞尔曲线的无人船自主航行航线规划方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(7):1224-1236.
ZHOU Yinfei, ZHANG Lihua, JIA Shuaidong, et al. Autonomous route planning method for unmanned surface vessels based on maximum navigable window sequence constrained Bézier curves[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(7): 1224-1236. (in Chinese)
[22] 江先亮,尚子宁,金光.基于无人船的水产养殖水质动态监测系统设计与实验[J].农业机械学报,2020,51(9):175-185,174.
JIANG Xianliang, SHANG Zining, JIN Guang. Design and experiment of dynamic water quality monitoring system for aquaculture based on unmanned surface vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 175-185,174. (in Chinese)
[23] 孟祥宝,黄家怿,谢秋波,等.基于自动巡航无人驾驶船的水产养殖在线监控技术[J].农业机械学报,2015,46(3):276-281,260.
MENG Xiangbao, HUANG Jiayi, XIE Qiubo, et al. Online monitoring equipment for aquaculture based on autonomous cruise unmanned boat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 276-281,260. (in Chinese)
[24] 黄华,张昊,胡晓林,等.基于改进 YOLO v5 的复杂环境下花椒簇识别与定位方法[J].农业机械学报,2024,55(3):243-251.
HUANG Hua, ZHANG Hao, HU Xiaolin, et al. Recognition and localization method for pepper clusters in complex environments based on improved YOLO v5[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 243-251. (in Chinese)
[25] 张林鎱,巴音塔娜,曾庆松.基于 StyleGAN2-ADA 和改进 YOLO v7 的葡萄叶片早期病害检测方法[J].农业机械学报,2024,55(1):241-252.
ZHANG Linzhuang, BAYIN Tana, ZENG Qingsong. Grape disease detection method based on StyleGAN2-ADA and improved YOLO v7[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 241-252. (in Chinese)
[26] 张丽珍,李延天,李志坚,等.基于混合空洞卷积和注意力多尺度网络的残饵密度估计[J].农业工程学报,2024,40(14):137-145.
ZHANG Lizhen, LI Yantian, LI Zhijian, et al. Residual bait density estimation based on hybrid dilated convolution and attention multi-scale network[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(14): 137-145. (in Chinese)
[27] 张岚,邢博闻,李彩,等.采用改进 SSD 网络的海参目标检测算法[J].农业工程学报,2022,38(8):297-303.
ZHANG Lan, XING Bowen, LI Cai, et al. Sea cucumber object detection algorithm using improved SSD network[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(8): 297-303. (in Chinese)
[28] 赵思琪,赵三琴,国振淇,等.池塘水产养殖精准投喂系统研制与试验[J].农业工程学报,2023,39(22):27-34.
ZHAO Siqi, ZHAO Sanqin, GUO Zhenqi, et al. Development and testing of precision feeding system for pond aquaculture[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(22): 27-34. (in Chinese)
[29] 魏天娇,胡祝华,范习禹.水产养殖中水质与鱼类行为双向映射模型研究[J].农业机械学报,2024,55(3):290-299.
WEI Tianjiao, HU Zhuhua, FAN Xiyu. Construction of bidirectional mapping model between water quality and fish behavior in aquaculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 290-299. (in Chinese)
[30] 王静,李蔚然,刘业强,等.基于计算机视觉的养殖动物计数方法研究综述[J].农业机械学报,2023,54(增刊1):315-329.
WANG Jing, LI Weiran, LIU Yeqiang, et al. Review of computer vision-based methods for livestock and aquaculture animal counting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.1): 315-329. (in Chinese)
[31] WANG C, LIU H, YU G W, et al. Wellbore-heat-transfer-model-based optimization and control for cooling downhole drilling fluid[J]. Petroleum Science, 2024, 21(3): 1955-1968.
[32] TONG S, QIAN D, YUAN K, et al. Fuzzy-inverse-model-based networked tracking control frameworks of time-varying signals[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2024, 11(7): 1708-1710.
[33] 魏新华,王庆壮,吉鑫,等.基于混合扩张状态观测器的农田平地机液压系统反步滑模控制研究[J].农业机械学报,2024,55(7):37-46.
WEI Xinhua, WANG Qingzhuang, JI Xin, et al. Backstepping sliding mode control for hydraulic system in farmland leveler based on hybrid extended state observer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 37-46. (in Chinese)