doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.020

基于无人船的水产养殖水质动态监测系统设计与实验

江先亮　尚子宁　金　光
（宁波大学信息科学与工程学院，宁波 315211）

摘要：针对传统水产养殖水质监测多使用部署在固定位置的无线监测节点，存在监测范围小、监测位置不灵活和部署成本偏高等问题，设计了基于自动无人船的水产养殖水质动态监测系统。该系统融合无人船和多个传感器进行水质采样，测量水温、pH 值和水体浊度等指标，通过岸基控制台将监测数据上传至云服务器。为保证系统的有效性和准确性，提出以自动无人船悬停采样为主的水质监测和低航速下的水质异常检测，结合基于地图解析的路径规划策略，实现无人船自主航行，以提升监测效率。经实验验证，与传统方案相比，动态监测得到的水温相对误差绝对值不大于 0.5%，pH 值相对误差绝对值不大于 1.43%，浊度相对误差绝对值不大于 4.9%，均在各传感器精度范围内，可满足监测需求。将该系统部署于水产养殖区，在 9 800 m^2 水域内共采集 731 组有效数据，测得各水质指标数值均在正常范围内，监测区域覆盖达水域面积的 68%。该方法为水产养殖业的水质监测和异常检测提供了解决方案。

关键词：水产养殖；水质监测；自动无人船；导航
中图分类号：S969；TP399　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2020)09-0175-11　　**OSID**：

Design and Test of Dynamic Water Quality Monitoring System for Aquaculture Based on Unmanned Surface Vehicle

JIANG Xianliang　SHANG Zining　JIN Guang
(*Faculty of Electrical Engineering and Computer Science*, *Ningbo University*, *Ningbo* 315211, *China*)

Abstract: Traditional monitoring systems realize water quality monitoring with a large number of monitoring nodes placed in the aquaculture area and communicating with wireless sensor network. The monitoring nodes combine multiple sensors to collect water quality data. The monitoring data changes on each node in the integrated water area reflects water quality status. But the quantity of nodes, monitoring scale and water coverage are limited. While insufficient number of monitoring nodes could not represent the entire water area, but increasing the density of monitoring nodes would increase the complexity of the system and cost. Therefore, the wider range of water quality data was collected, the more intuitive water quality status distribution in the water area reflected. Expanding the monitoring scope could avoid the abnormality or missed inspection of water quality caused by inadequate coverage. A dynamic monitoring system for aquaculture water quality monitoring was designed based on unmanned surface vehicle. The system expanded the monitoring scale, increased the monitoring range and collected more extensive water quality information by dynamic monitoring. It also expanded the current water quality monitoring and anomaly detection programs. The dynamic monitoring system consisted of unmanned surface vehicle, shore-based console, manual remote controller and cloud monitoring server. The unmanned surface vehicle integrated Raspberry Pi and multiple sensors to collect water temperature, pH value and water turbidity, and the data was sent back to the shore-based console and uploaded to the cloud server. The dynamic monitoring system designed a data acquisition scheme based on hover sampling by unmanned surface vehicle, the returned data composed longitude, latitude, roll angle, pitch angle, yaw angle, ultrasonic distance, water temperature, turbidity value and pH value in sequence. The data returned the shore-based console and performed effective filtering on all received packets. The vehicle ran a path

收稿日期：2020-01-02　修回日期：2020-02-25
基金项目：浙江省基础公益研究计划项目(LGG18F020007)、浙江省高等教育教学改革研究项目(JG20180070)和宁波市自然科学基金项目(2017A610129)
作者简介：江先亮(1986—)，男，讲师，博士，主要从事网络传输控制算法和系统、物联网系统研究，E-mail：jiangxianliang@nbu.edu.cn

planning strategy based on map analysis. It calculated the position and heading angle in real time to assist in automatic navigation to improve monitoring efficiency, and designed an obstacle avoidance system to detect obstacles in front of the hull. After testing and verifying the feasibility of the system and optimizing the monitoring efficiency of the system, the deployment experiment was carried out in Zhoushan aquafarm. It was verified by experiments that the absolute value of the relative error of water temperature was not more than 0.5% compared with the traditional method, the absolute value of the relative error of the pH value was not more than 1.43%, and the absolute value of the relative error of turbidity was not more than 4.9%, all the data was within the accuracy range of the sensor and met the monitoring needs. The system was deployed in aquaculture waters, collecting 731 sets of valid data within 9 800 m^2, covering approximately 68% of the water surface range, which reflected the overall water quality information of the water area and provided abnormal conditions in the water surface area. The dynamic monitoring system improved the shortcomings of current aquaculture water quality monitoring methods and expanded application of the Internet of Things technology in the field of agricultural engineering. Compared with current monitoring program, the scope of water quality monitoring was expanded, the monitoring efficiency was improved, and the monitoring cost was greatly reduced. It could be regarded as monitoring strategy and technical means for aquaculture water quality monitoring which had better application and promotion value and still had somespace to be improved.

Key words: aquaculture; water quality monitoring; unmanned surface vehicle; navigation

0 引言

我国拥有辽阔的水域面积,为水产养殖业提供天然优势,水产养殖对国民经济有重要影响[1]。水体环境安全对水产养殖产业影响较大,环境受到污染会影响生态质量、威胁养殖安全,并导致不同程度的减产。因此,需要有效监测水质状态,并及时作出响应[2-6]。

国内外专家学者对水产养殖业的水质监测系统进行了诸多研究[7-9]。早期,采用离线检测方法,现场取样后送至实验室分析水样,其检测周期长、数据反馈慢。在计算机网络技术普及后,采取在水源设置检测点,铺设线缆传输数据的方法[10]。后来基于无线网络通信的水质监测系统逐步成熟,在目标水域部署节点,采集水质数据回传并进一步处理[11]。文献[12]基于无线传感器网络(Wireless sensor networks, WSN)设计了水产养殖水质监测系统,节点间进行 905 MHz 无线通信,汇聚节点采用 GPRS 技术上传数据至服务器。文献[13]基于 ZigBee 协议设计了远程水质监测系统,由 ZigBee 终端节点组网监测养殖池的水温、pH 值和溶解氧数据。文献[14]设计了采用 WiFi 组网的螃蟹养殖基地监控系统,实现数据直达服务器。

上述研究中终端节点位置固定,使网络的监测覆盖范围受限,通过大幅扩充节点数目提高监测范围会增加成本和网络复杂度,不易管理,且部署过多节点会影响养殖区内的正常作业[15-17]。文献[18]基于 LoRaWAN 进行改进,在长约 900 m、宽约 850 m 的海岛水产养殖区部署 33 个 ZigBee 节点或 11 个 LoRa 节点监测水质,相比之下 LoRa 技术可提供更大的网络覆盖范围,降低建网难度并节约了成本。

池塘养殖区常由多个中型池塘组成,部署的监测节点数目不足则无法覆盖整个水域,而增加监测节点密度会增加系统复杂度,并极大地增加成本,故仍需对其进行改进。池塘养殖水深为 1.0~3.5 m,在此深度范围内各水质指标可视为一致,故上述系统中终端节点将传感器置于水面采集水质,综合水域内各节点数据变化反映水质状态。受无线传感器网络的规模及成本限制[19],监测节点仅设置于池塘入水口和出水口等岸基位置,数量少、监测范围小,且对水域的覆盖能力有限。若距监测节点较远处水域受到污染,因池塘养殖常采用微流水池塘设计,则在较长时间后节点才能检测到轻微异常值,其反馈不及时而增加了风险。因此,采集的水质信息范围越广,越能直观地反映水域内的水质状态分布,扩大监测范围可以减少因覆盖不到位造成的水质异常迟检或漏检情况。

本文设计一种基于自动无人船的水产养殖水质动态监测系统。系统由采集端、监测端、遥控端和云平台组成,将携带多种传感器的无人船在水面航行作为动态监测节点,按预设方案实现自动航行和停船测量,以期为实现水产养殖水质监测和异常检测提供解决方案和技术手段。

1 动态监测系统设计

1.1 系统架构

本文设计的水产养殖水质动态监测系统,终端节点基于自动无人船实现,由自动无人船、岸基控制

台、手动遥控端和云监测平台组成，整体架构如图 1 所示。

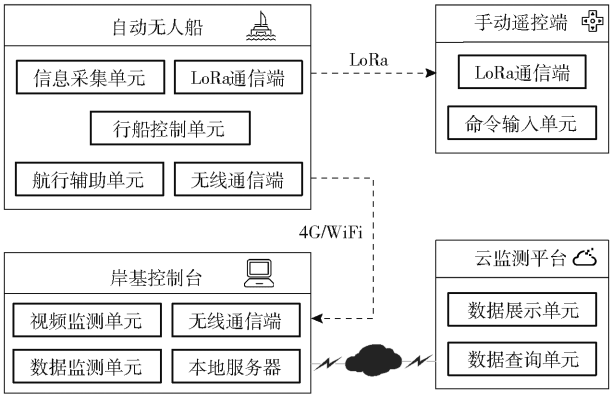


图 1　监测系统架构

Fig. 1　Architecture of monitoring system

系统中自动无人船作为动态节点采集水质数据，可工作于遥控模式或自动模式。在遥控模式下由手动遥控端对无人船下发控制命令，通过 LoRa 协议[20]与无人船进行点对点通信。在自动模式下无人船在由 GPS 模块[21]、惯性测量单元（Inertial measurement unit，IMU）[22]、电子罗盘和双目摄像头[23]等组成的航行辅助单元协助下实现自主航行。

航行过程中船载水质传感器实时采集水质信息，并通过 4G 或 WiFi 网络将数据实时回传岸基控制台，处理分析后本地存储。岸基控制台上传数据至云监测平台并存至云端服务器，实现多端实时监控和历史记录查询功能。

1.2　自动无人船设计

无人船是一种自动化的水面监测平台，由小型船体搭载多传感器实现，可完成水面自主航行的无人船称为自动无人船[24]。近年来在军事、科研等领域中出现了一些高精度无人船[25]，在监视侦查、水文测绘、水体勘测、水面打捞、灾难预警和应急事件响应等方面得到应用[26]。

由于在养殖水域进行水质监测存在特殊需求，本文设计的无人船也做出相应的结构设计。为避免船体侧翻使电子元器件污染养殖水域，船体设计采用稳定的双体结构，可在 6 级风力内正常航行。由于高速运转的水下螺旋桨会伤及养殖鱼类，若缠入水草、渔网会使航行过程出现危险，因此船体使用风动螺旋桨作为动力装置，实际航行过程噪声较小，对养殖环境无不良影响。无人船船身采用玻璃钢材质，支架使用钢结构，在船体交叉部位用绝缘胶带和防水胶进行加固，控制系统用塑料盒装载，不影响无线信号接收。无人船船体规格为 855 mm × 530 mm × 565 mm，总质量约 1 650 g，航速最高达 18 km/h，在速度 12 km/h 下运行时最大吃水深度为 55 mm，配置 5 200 mA·h 的12 V 电池供电，可满足至少 4 h 连续运行需求。无人船实物如图 2 所示。



图 2　双体自动无人船实物

Fig. 2　Catamaran-type unmanned surface vehicle

选择具有代表性的两款在售无人船与本文无人船作对比，主要特点如表 1 所示。专业钓鱼爱好者常采用通用款无人船作为辅助设备，不具备自动运行功能。而高精度无人船近年来高速发展，逐步公开销售，船体面向海洋测绘等用途设计，其精度高、开发周期长且售价较高。本文设计的自动无人船针对水产养殖水体的特殊要求设计，设计过程中加以成本控制，并保证足够精度。

表 1　无人船参数对比

Tab. 1　Comparison of unmanned surface vehicles

参数	无人船类别		
	通用款无人船	高精度无人船	本文无人船
船体尺寸/（mm × mm × mm）	330 × 560 × 200	1 200 × 700 × 310	855 × 530 × 565
船体结构	单体船	气囊船	双体船
遥控方式	433 MHz 数传模块	未公开	LoRa 模块
遥控距离/m	≤300	≤2 000	≤1 200
控制方式	手动遥控	手动遥控 自动导航	手动遥控 自动导航
最高航行速度/（km·h^{-1}）	8	21	18
主要用途	打窝船	海洋测绘 水域测深等	水产养殖业 水质监测
总价/万元	0.35	10	1.2

完成无人船基本结构设计后按预期功能要求设计硬件平台，开发控制系统以满足监测需求。自动无人船硬件平台基于树莓派 3B + 开发板[27]实现，集成航行辅助模块、障碍检测模块、环境信息采集模块、无线通信模块和动力模块等，各功能模块架构如图 3 所示。

参考水质条件对水产养殖环境的影响[28]，选择水温、pH 值和浊度 3 个水质关键指标反映水质状态，无人船搭载相应传感器，主要参数如表 2 所示。

该 pH 值传感器检测时需要至少 30 s 响应时间，浊度传感器推荐在静止状态下检测，水温传感器可实时检测。这 3 种传感器代表了主流水质传感器的不同响应特点，使用时需按其不同特点设计相应

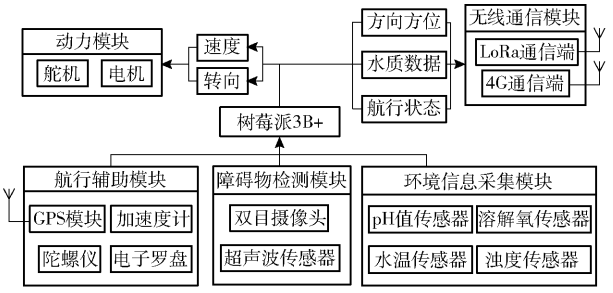


图 3 自动无人船功能模块架构

Fig. 3 Architecture of unmanned surface vehicle

表 2 传感器性能和监测参数

Tab. 2 Sensor performance and monitoring parameters

传感器类别	型号	量程	精度	响应时间
水温传感器	DS18B20	-10 ~ 85℃	±0.5℃	≤750 ms
pH 值传感器	SEN0161	0 ~ 14	±0.1	0.5 ~ 2 min
浊度传感器	SEN0189	0 ~ 3 000 NTU	±1 NTU	≤500 ms

的使用策略,本研究为使用以上水质传感器的无人船设计了悬停采样和低航速采样的运行策略。若有其他水质指标的监测需求,可为无人船编写驱动程序并接入相应传感器,按传感器具体特点设计合适的使用策略。

自动无人船采用多种基础模块获取实时状态,经融合算法处理后得到行船参数作为数据支持,按系统行船规划方案,实现自主航行功能。自动无人船船载的航行辅助模块计算实时状态,选用 NEO-7N 芯片实现 GPS 定位[29],在开阔区域收集星历信息后定位误差可控制在 0.5 m 以内。IMU 系统包括加速度计和陀螺仪,选用 MPU-6050 模块实时采集 6 轴加速度和角速度信息,经数据融合后计算出无人船实时的横滚角和俯仰角,并搭载 HMC5883L 型电子罗盘模块计算航向角。双目摄像头和超声波传感器组成了障碍物检测模块,实现避障功能,以保证行船安全。

自动无人船通过无线通信方式与手动遥控端、岸基控制台进行数据交互。信号传输系统为独立的两部分,遥控信号由 LoRa 模块传输,可靠通信距离约 1.2 km;自动无人船数据报文及视频流由树莓派板载 WiFi 模组和外置 4G 通信模组进行远距离传输。

1.3 岸基控制台设计

自动无人船作为动态监测节点,由操作人员监控,因此动态监测系统的核心部分为自动无人船和部署于岸边的岸基控制台上位机软件。系统上位机软件使用 C++开发,与 Matlab 混编进行数据处理,可运行于 8.1 及以上版本的 Windows 平台操作系统。

岸基控制台通过 WiFi 和 4G 网络与自动无人船节点建立稳定的 TCP 连接,接收其回传的数据报文,处理地理位置、运行状态和水质数据等,并实现本地存储。分析连续数据报文并绘制数据曲线得到可视化结果,将实时地理位置标注在卫星地图中组成连续路径,通过以上方式直观地实现船体运行状态监控。监测系统基于流媒体直播技术设计了无人船的视频回传方法,依靠控制台与无人船间建立的稳定 TCP 连接,将无人船摄像头采集的水面视频流通过 RTMP(Real time messaging protocol)协议进行实时推流,清晰度和帧率等参数可由使用者自行设置,使自动无人船行驶至视距外时可确认行船安全,岸基控制台功能结构如图 4 所示。

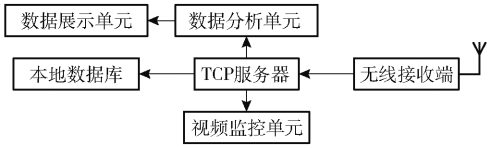


图 4 岸基控制台功能结构框图

Fig. 4 Architecture of unmanned surface vehicle console

1.4 手动遥控端设计

自动无人船具备自主航行能力,也具备基本的遥控行船功能。手动遥控端基于 Arduino UNO R3[30]设计实现,集成 LoRa Shield 通信模组传输速度和方向等控制命令,实现电机调速、舵机转向和模式切换,外接摇杆或键盘作为命令输入单元,手动遥控端实物如图 5 所示。本研究为监测系统设计了严格的使用流程,操作过程中需遵守安全规范,自动无人船下水时切换为遥控模式,确认船体正常工作后驶离岸边,切换至自动模式运行。

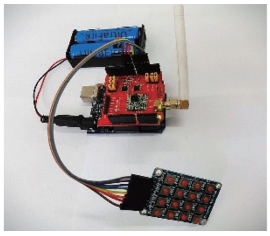


图 5 手动遥控端实物

Fig. 5 Manual remote control console

1.5 云监测平台设计

为实现监测端的便携性,监测系统中实现了移动监控端软件,部分界面如图 6 所示。软件可运行在 Android 6.0 以上操作系统,集成云监测平台和手动遥控端的功能,操作人员安装安卓手机 APP 可进行操作。

为实现远程监控,监测系统也实现了云监测平台,基于 AngularJS 框架和 Node.js 开发,岸基控制台接收数据后,将行船记录实时上传云平台,每组数据包括时间、位置坐标、各项水质数据和航行状态数

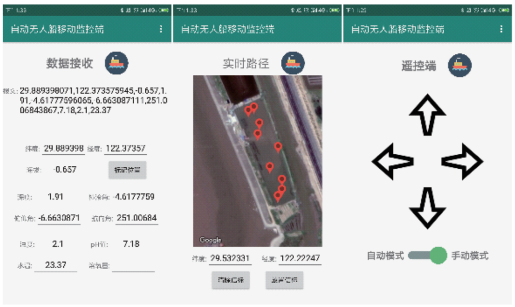


图 6　移动监控端界面

Fig. 6　Interface of mobile monitoring console

据[31]。用户登录云平台，可查看实时的运行状态和航线，并查询历史水质监测任务和航行记录。

2　自动无人船自主航行和水质监测

为实现动态监测系统的各项功能，需要获取并处理自动无人船各项行船数据，设计行船路径规划方式，并针对传感器特点设计采样方案。

2.1　行船数据处理

自动无人船在航行中使用 GPS 模块、IMU 和电子罗盘等航行辅助设备采集基本数据，以计算实时姿态角、地理位置和航向等数据实现自动航行。

自动无人船航行时由 IMU 采集 3 个方向的加速度分量和旋转角速度，通过数据融合计算实时横滚角和俯仰角确保行船安全，倾角过大时切换至遥控模式，或将舵机回正并降低电机转速以维持船体稳定。自动无人船采用 MPU－6050 模块作为船载 IMU，由 3 轴陀螺仪和 3 轴加速度计等组成，当船体坐标系和地理坐标系重合且处于非加速运动状态时，各轴加速度计的测量输出 $\boldsymbol{A}_i$ 为

$$\boldsymbol{A}_i = [0 \quad 0 \quad g]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

式中　g——重力加速度

当船体姿态处于任意状态时，加速度计的测量值 $\boldsymbol{A}_b$ 为

$$\boldsymbol{A}_b = [a_x \quad a_y \quad a_z]^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

式中　a_x、a_y、a_z——x、y、z 轴加速度

由载体坐标系相对导航坐标系的三次转动角可确定姿态矩阵 $\boldsymbol{T}$[32]，则有 $\boldsymbol{A}_b = \boldsymbol{T}\boldsymbol{A}_i$，即

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta \\ \sin\gamma\sin\theta\cos\psi - \cos\gamma\sin\psi & \sin\theta\sin\gamma\sin\psi + \cos\gamma\cos\psi & \cos\theta\sin\gamma \\ \sin\theta\cos\gamma\cos\psi + \sin\gamma\sin\psi & \sin\theta\cos\gamma\sin\psi - \sin\gamma\cos\psi & \cos\gamma\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中　θ——俯仰角，(°)

γ——横滚角，(°)

ψ——航向角，(°)

由式(3)可计算出船体俯仰角 θ 和横滚角 γ

$$\theta = \arcsin\left(-\frac{a_x}{g}\right) \tag{4}$$

$$\gamma = \arcsin\frac{a_y}{g\cos\theta} \tag{5}$$

由于船体倾覆会对养殖水域造成经济损失，故如何保持船体稳定是设计中的关键步骤，使用双体船结构替代传统结构后，经航行实测验证俯仰角与横滚角在 －5°～5°内波动。而风力作用虽对倾角影响极小但会改变航向，因此自动无人船在航行时需计算每一时刻的地理位置和航向角，以计算目标方向与当前航向的差值，实时监控其是否按预设线路航行并纠正航线偏差。实时定位时提取获取的 GPS 报文中“$GPRMC”信息，从其中分离经度、纬度和海拔数据，精确度保留至小数点后 8 位，合并至数据报文一并回传岸基控制台。在定位过程中除位置提取外，需要对卫星进行时钟校准[33]，需要至少 4 个可见卫星计算时钟偏差 Δt_r 实现精准授时，并计算实时位置坐标 (X, Y, Z)，节点与卫星间的距离 ρ' 计算式为

$$\rho' = \sqrt{(X - X_j)^2 + (Y - Y_j)^2 + (Z - Z_j)^2} + c\Delta t_r \tag{6}$$

式中　X_j、Y_j、Z_j——第 j 个卫星 X、Y、Z 轴空间坐标值

c——光速，m/s

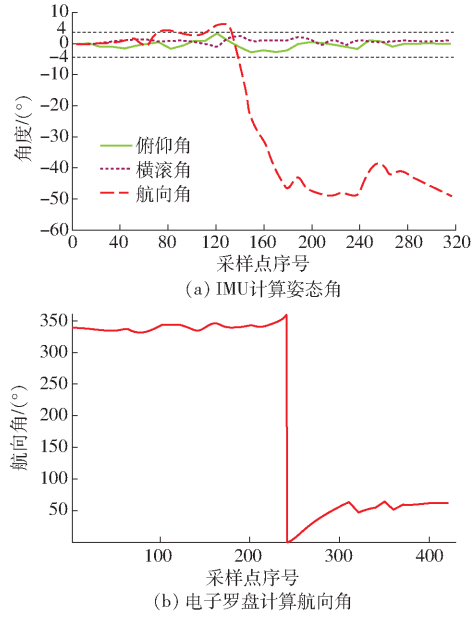
实验选择浙江省宁波市一长约 200 m 的狭长河道(29°54′24″N，121°38′12″E)验证自动无人船的航行定位准确度，GPS 芯片通电后冷启动[34]，轮询所有卫星并锁定信号获取可靠的星历数据，经约 3 min 初始化后实现精确定位。保持约 12 km/h 的速度匀速航行，实时获取的 GPS 坐标与实际位置直线误差小于 0.5 m，线性拟合定位路径点后可反映真实航线。

自动无人船获取地理位置后计算与当前目标航点间角度差，比较实时航向角差值确定航线偏差，当差值大于 30°时转动舵机调整航向。式(3)中航向角 ψ 由 IMU 数据计算，是相对地磁北向的航向角，与重力方向正交，在该方向无可靠值校正数值，故产生积分漂移。

因此按以上分析设计岸基实验和航行实验进行验证。由岸基实验确认俯仰角和横滚角的计算数值可靠性。将装有 IMU 的无人船移除动力设备，通电并旋转船体调节俯仰角，依次转动至 0°、90°、180°和 270°的基准角。并分别采用慢速转动、快速转动和抖动转动 3 种方式旋转至基准角度。实时观察俯仰角计算数值与基准角的差值并添加补偿角，多次重复此过程，直至计算角度与基准角间的差值小于 0.3°，之后按相同方式校正横滚角。经此校正后计

算数值可视为航行中的实际俯仰角和横滚角，此时不能再改变 IMU 的安装位置。后将无人船静置观察实时角度计算结果，输出间隔为 0.2 s，俯仰角和横滚角均不再改变，而观察到航向角有持续的数值漂移，实验用 IMU 的航向角计算数值漂移量约为 5 min 漂移 6°，与无人船此时的静置状态不符，故此方法计算的航向角数值不可用。连接无人船动力设备进行航行实验验证，综合多次实验结果，航行实测的俯仰角与横滚角在 -5° ~5°内波动，无人船的双体结构和较低的航速保证其具备平稳运行能力。

选取一次航行实验结果为示例实验，在此次航行中行船状态由直行经一次转向后变为再度直行，记录此航行过程中横滚角、俯仰角和航向角波动如图 7a 所示，直行过程间隔 2 s 记录一次采样点，转向过程间隔 0.2 s 记录一次采样点。



(a) IMU计算姿态角

(b) 电子罗盘计算航向角

图 7 姿态角波动曲线

Fig. 7 Fluctuation of attitude angle

分析图中角度变化结果，可见本次航行中俯仰角和横滚角的波幅在 -4° ~4°之间，反映了双体船稳定的运行状态。而航向角出现了较大漂移，在直线航行阶段船体实际航向角维持不变，而图中航向角出现了持续上扬，与实际直线运动的状态不符，无人船转向后的直行阶段计算航向角也出现了上扬，此时测量的航向角已不能满足监测要求。

为解决上述航向角计算问题，采用电子罗盘计算实时航向角，选用 HMC5883L 型三维磁阻传感器，由 3 个相互垂直的磁阻传感器组成，检测轴向的地磁场强度。通电后校正罗盘消除地磁偏移影响，测得其 x 轴、y 轴坐标为 X_H 和 Y_H，运行过程中近似水平安置，由电子罗盘输出可计算出实时航向角

$$\psi = \arctan(Y_H / X_H) \tag{7}$$

由于双体结构十分稳定，船体在航行过程中可近似视为水平，故无需陀螺仪和加速度计对由电子罗盘计算的航向角进行补偿。选取采用此方案的一次航行测试数据如图 7b 所示，无人船经一次转向，由图可见航向角曲线与图 7a 中航向角曲线相比波动大幅降低，证明其消除了角度漂移，在转向前与转向后的直线运行过程可正确计算航向角，电子罗盘测量得到的航向角保持长时间可靠测量。计算出的航向角和 GPS 协作实现航线监控，为自动航行提供基础数据。若航行中定位信号中断，参考可定位点的坐标及航向角，可计算实时近似位置并等待 GPS 重新定位，避免意外情况。

2.2 行船路径规划

实时获取位置、航向和姿态角等数据后，自动无人船具备自主航行条件，降低监测成本并提高监测效率。

在航行前可通过静态规划的方式进行航行规划。首先对目标水域地图进行预处理，通过地形分割的方法处理水域卫星图，结合经纬度信息计算带坐标的水域方格地图。处理后的地图单位格点面积为 1 m^2，以每个单位格点左下角地理坐标点为二维格点坐标，坐标 x 轴为水域地图经度，坐标 y 轴为水域地图纬度，并带有一维值为 0 或 1 的数据作为障碍物标记，岸基位置及可观测的水中固定障碍物第三维数值置 1，水面可通航区域置 0。

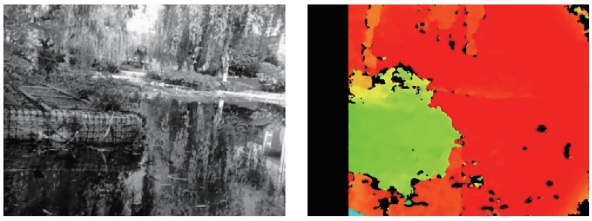
由于水面环境障碍物较少，如本研究选择的 8 处主要测试水域中，有 6 处都是完全无障碍物的水面，处理得到这些水域的地图后可在地图中按序选择数个格点作为目标航点，逐次连接为预设航线。自动无人船航行时按照航线直线运行，并实时计算各角度数值及实时位置，比较 GPS 位置坐标和目标点的角度差得到预期航向，在运行时会受到水流和风力的干扰，需要比较航向角与预期航向的差值以检测当前路径是否偏离航线，当航向角偏差大于 30°时需微调舵机回正航向。在这一过程中，自动无人船由 WiFi 模块和 4G 模块将采集的行船数据、测量的水质数据和捕捉的图像流回传岸基控制台。

而少量水面存在数种障碍物，如水生植物、人工放置的杂物及漂浮的枯木等，通过卫星图处理时较大的固定障碍物可自动标注，但若地图更新不及时或障碍物体积较小时就会遇到难以标注的问题，如池塘养殖中最常见的障碍物是水中的围栏和支架，难以提前确定位置。因此本研究采用离线标注方法进行障碍物标注，也可预先遥控无人船确认障碍物地理位置点。

对完成障碍物标注的地图，设计基于 A* 算法

的路径规划方案[35-36]。自动无人船航行前获取处理好的水域地图，采用预设规划算法计算航行路线，计算路径点时，为保证船体安全，将距船体 3 m 内的障碍物视为阻挡行进路线。并将最大转向半径设置为 90°。由于在航行中长时间保持舵机转动会影响转向效率，且长半径的转向易受到风力和水流的干扰而出现偏差，故算法减少转向次数、避免曲线航迹，在规避障碍物时首先生成曲线路径，后将该路径优化为直角转弯路径，以减少舵机转动时长，使自动无人船可经数次直角转向到达目标点。

为避免自动无人船在视线之外航行时遇到的特殊情况，减少航行安全隐患，自动无人船也搭载了超声波传感器和双目摄像头进行实时障碍物检测。船体前方放置超声波探头，在约 60°的扇形范围内可感知前方障碍物距离，检测距离 0.25 ~ 7 m，检测到未知障碍物后降低电机转速，此时可切换至手动模式人为干预，或确定障碍物距离后在地图中添加障碍点，再运行规划算法重新计算路径。搭载的双目摄像头分辨率为 2 560 像素 ×720 像素，视场角约为 72°，通过立体视觉方法检测障碍物距离，基于半全局块匹配（Semi-global block matching，SGBM）算法实时提取图像深度[37-38]，选取航行测试中一次清晰的航行图像处理结果如图 8 所示。实际距离较近的障碍物在处理结果中颜色偏绿，距离较远的障碍物在处理结果中颜色偏红。



(a) 左摄像头采集的图像　　(b) SGBM算法图像处理结果

图 8　双目摄像头的深度图像分析

Fig. 8　Depth image analysis of binocular camera

从图像中提取每个像素点的深度信息，预设处理效率为 2 f/s，辅助超声波传感器确认障碍物距离。由于采用实时避障可提供安全保障，对自动无人船的进一步研究将围绕动态行船规划方案展开。

为便于自动无人船下水和靠岸，并使其能应对紧急状态，设计遥控模式与自动模式的切换功能。遥控模式下采用 LoRa 协议传输控制信号，手动遥控端的 LoRa 发送节点与自动无人船的 LoRa 接收节点之间建立点对点通信。经多次实验验证，部署的 LoRa 网络可在直线距离至少 800 m 的水面范围内可靠通信。当设置的发送功率大于 20 mW 时，节点平均丢包率在 3.6% 以内。

2.3　水质监测的实现

使用具备自主航行功能的自动无人船进行水质监测可减少人力开销并降低操作人员的技术门槛。为确保可靠监测、提升测量效率，针对船载水质传感器的特点，本研究设计了动态监测系统的监测方案。

船载的 DS18B20 型水温传感器成本较低且精度符合要求，可伸入水下约 0.8 m 深处，能实时响应温度变化，因此每次采集到的都是有效数据。船载 SEN0161 型 pH 值传感器使用由玻璃电极和参比电极组成的复合电极，测量水溶液中的氢离子活度，每两个月需要进行一次校准，实际误差在 ±0.1 范围内，运行时将探头没入水面。实际使用中测试传感器的响应时间为 0.5 ~ 2 min，因此当自动无人船处于低速运行时或悬停稳定后测得的数值才可作为有效数据使用。船载的 SEN0189 型浊度传感器由液体透光率和散射率判断水体浊度，每次响应时间约为 500 ms，运行时其连线附于船身，探头做好放水措施后没入水中。由于自动无人船航速较快时会产生泡沫和水面波动，影响传感器探头中红外接收管的实际透光量，因此仅将船体悬停时的电压读数作为有效数据，将电压转换为以 NTU 为单位的水体浊度数据。

基于以上对传感器的分析，本研究设计以悬停采样为主的运行策略，当航行至距地图预设采样点 1 m 内后停止运行，自动无人船惯性漂移一段距离之后处于悬停状态，维持至 pH 值传感器读数稳定。待 pH 值稳定后，此时的水温、浊度和 pH 值读数均为有效数据，因悬停时船体会产生少量漂移，以接下来启动时的 GPS 数据为实际采样点位置。为提高监测效率，也设计了低航速采样的运行策略，当无人船向下一个预设点前进时，船速维持在约 3 km/h 的低速状态，此时 pH 值和浊度读数仍较为稳定，经后期筛选后可判断是否可用，在实际监测时以悬停采样为主。运行过程中 2 s 上传一次数据结果，将经度、纬度、横滚角、俯仰角、航向角、超声波距离、水温、浊度和 pH 值等按序组成报文回传岸基控制台。对收到的全部报文进行异常值筛选后得到有效数据，其中在低航速采样下得到的 pH 值为待处理数据，浊度为不可信数据，待悬停采样读数稳定后得到的 pH 值、浊度均为可信数据。

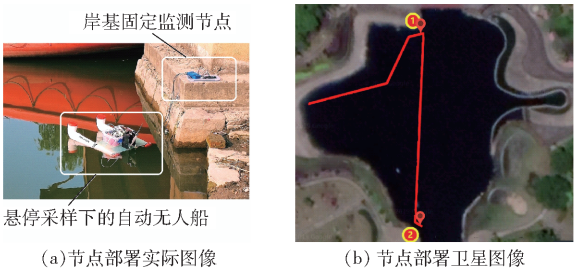
在水质监测过程中，水温传感器的输出既快速又精确，因浊度传感器和 pH 值传感器的特殊性而选择悬停采样的方式，将输出的电压模拟量转换为精确的浊度值和 pH 值，满足精确的水质监测需求。而对于水质异常检测或突发状况检测的情况，将 pH 值传感器和浊度传感器设置为读取电压数字量进行

采集,调节电位器以改变触发阈值,这时采用低航速采样的运行策略虽然降低了传感器读数的精度标准,但可提高紧急状态下的运行效率,及时反馈报警信息。

3 实验测试与实地部署

3.1 实验验证

为验证动态监测系统监测效果,与文献[18]的 LoRa 监测系统进行对比,其中 LoRa 终端节点使用与自动无人船相同的水质传感器,进行动态系统与静态系统差异实验。以 2019 年 5 月 9—11 日 14:00—17:00 的实验为例,此时气温约 30℃,天气连日放晴,无降水干扰,实验地点为浙江省宁波市宁波帮公园内一处景观水体(29°54′57″N, 121°37′24″E),总面积约为 2 450 m^2。节点部署如图 9 所示,在岸基入水口和出水口设置 2 处 LoRa 监测节点,将各传感器探头均伸入水面,自动无人船运行至距终端节点 2 m 范围内悬停采样,数据稳定后将同一时刻的 LoRa 节点数值进行比较,图中标记处为采样点位置。



(a)节点部署实际图像 (b) 节点部署卫星图像

图 9 实验环境图像

Fig. 9 Sampling point and water area

经实验验证,处于悬停采样状态下的自动无人船测量数据与同一位置终端节点测量数据相似,选取部分数据样本如表 3 所示。不同传感器规格存在微小差异,实际测量中水温相对误差绝对值不大于 0.5%,pH 值相对误差绝对值不大于 1.49%,浊度相对误差绝对值不大于 4.9%,均在传感器精度范围内,因此自动无人船可达到固定节点的监测效果。

确定动态监测节点悬停采样时的监测效果后,可在水域中实际选择航点作为悬停采样位置,选择时没有硬性规范,应尽量满足节点分布分散、节点位置具有代表性和优化航行顺序等原则并按需设置。校验无人船实际测量结果后可见小范围内水质数据基本一致,总结全部实验结果后,定义在动态系统中每个无人船监测点可代表半径 5 m 圆形范围内的水质状况,以便后续数据分析工作。由于所处的环境不同,在一定范围内水体中水质数值既可能出现梯度方向,也可能是波动数值,因此不能依据数值变化设定阈值,否则会导致误判节点监测范围。

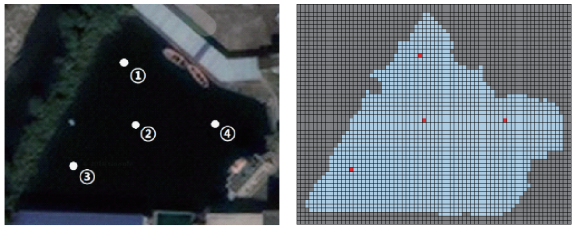
表 3 对比实验水质测量结果

Tab. 3 Comparative experiment results of water quality measurement

采样点位置	水温		pH 值		浊度	
	测量值/℃	相对误差/%	测量值	相对误差/%	测量值/NTU	相对误差/%
LoRa 节点 1	22.35	-0.31	7.51	1.06	65	1.5
悬停采样点 1	22.28		7.59		66	
LoRa 节点 2	22.98	0.39	7.32	-0.68	70	-2.8
悬停采样点 2	23.07		7.27		68	
LoRa 节点 3	21.65	-0.50	7.71	1.43	105	4.8
悬停采样点 3	21.54		7.82		110	
LoRa 节点 4	22.87	-0.26	7.37	-0.54	75	2.6
悬停采样点 4	22.81		7.33		77	
LoRa 节点 5	22.44	0.17	7.43	0.26	71	-4.9
悬停采样点 5	22.48		7.45		67	
LoRa 节点 6	23.91	0.12	7.55	0.93	74	4.1
悬停采样点 6	23.94		7.62		77	
LoRa 节点 7	23.05	0.30	7.19	-0.69	59	3.4
悬停采样点 7	23.12		7.14		61	

3.2 系统综合测试

确定监测方案后,为验证系统可行性进行了大量综合实测,确认系统可靠性和监测方案的实际效果。于 2019 年 8 月 14 日部署于浙江省宁波市宁波大学景观池塘(29°54′29″N, 121°37′49″E)进行实测,当日晴朗且风力较小,之前雨水持续数日。实验水域属园林水景且为静水,有入水口和排水口,水面在风力作用下波动,水域面积约 2 250 m^2,水体中部分区域设置围栏控制浮水草本植物凤眼蓝的生长,卫星图像如图 10a 所示。



(a) 实验水体卫星图像及采样点 (b) 实验水域方格地图

图 10 实验水体及采样点

Fig. 10 Water area and sampling point

在行船测试前,处理水域卫星图像得到方格地图如图 10b 所示,按采样原则顺序选取 4 处格点作为采样点,行船过程中船体保持低速航行并依序航行至采样点 1 ~4。到达后悬停采样测量水质数据,距目标点 2 m 范围内停止运行,船体惯性漂行后视为抵达目标,等待传感器读数稳定,将稳定后的水温、pH 值和浊度作为该点的悬停采样结果,并将当前采样点坐标更新为再度航行前测量的经纬度坐标。得到的采样结果如表 4 所示。

分析采样结果发现采样点 1 ~3 处各项数值稳

表 4　实验水域水质测量结果

Tab. 4　Results of water quality measurement in test area

采样点位置	水温/℃	pH 值	浊度/NTU
采样点 1	24.48	7.43	81
采样点 2	24.59	7.31	89
采样点 3	24.87	7.49	87
采样点 4	24.05	8.59	165

定，存在小范围波动，可代表该水域水质监测结果，多日降雨降低了整体 pH 值。在水域 pH 值为 7.10 时最适合凤眼蓝生长[39]，有机物过多会导致水体富营养化，pH 值采样结果与该水域边缘凤眼蓝大量繁殖的结果一致。采样点 4 的数值与其他 3 处略有差异，与其近处教学楼施工及近日台风天气有关，岸边堆砌的砂石、土方等建筑垃圾清理不及时造成了水质数据波动，是存在异常的区域。为验证低航速采样效果，将浊度传感器及 pH 值传感器切换至阈值模式，调节电位器将 pH 值阈值设为 8，浊度阈值设为约 120 NTU。无人船保持约 3.2 km/h 的低速在采样点 4 附近岸边环绕航行，浊度传感器回传异常标记，约 40 s 后，pH 值传感器回传异常标记。

本次实验中无人船控制设备由 3 800 mA·h 的 5 V 锂电池供电，另由一同规格电池为摄像头和超声波传感器等外设供电，船体动力设备则装配 5 200 mA·h 的12 V 锂电池独立供电。无人船元件盒中预留了电池位，结合双体船良好的载重能力，可换用更大容量电池提升续航能力，装配注意电池质量以免影响平衡性，当前实验中的供电方案可满足至少 3 h 的持续监测需求。

经一段时间实测，为船体在支架交界处和船体吃水部位使用防水胶及绝缘胶带加固，在船体前方使用绝缘胶带保护船身，提升船体的耐久性和使用期。裸露在元件盒外的电机、舵机和电调均采用防水设计，但仍需避免在大风、降雨等恶劣天气下使用。

3.3　系统实地部署

经实验验证系统有效性后，在舟山养殖水域进行实测。该养殖区位于舟山市普陀区近西岙隧道处（29°54′1″N，122°22′21″E），总面积约 450 000 m^2，单池塘面积约 9 800 m^2，饲养石斑鱼、老虎斑和凤鲚等多种经济鱼类。池塘水域独立规划、形状规则，在水域边缘设有多个独立网箱进行混养，实验场景如图 11 所示。在岸边高处部署岸基控制台，由两位操作人员进行实验，分别监控自动无人船的运行状态和无人船回传的数据状态。

本次实测时间为 2019 年 5 月 25 日 13:00—15:00，当日风力 3 级，无雨水天气。自动无人船控制单元采用两节 4 200 mA·h 的3.7 V 锂电池供电，



(a) 实验养殖水域　　(b) 无人船运行测试

图 11　舟山养殖区系统实测场景

Fig. 11　System test in aquaculture area of Zhoushan

防水电机则采用 5 200 mA·h 的12 V 锂电池独立供电。自动无人船与岸基监测台的最远距离为 224 m，预先测试在这一距离下 LoRa 信号丢包率低于 0.1%，确保遥控安全。将自动无人船遥控至距离岸基 5 m 外后开始向预定航点自动航行，每隔 2 s 向岸基监测台回传一次实时数据。在池塘养殖区（29°53′24″N，122°22′24″E）内持续航行完成对该池塘的数据采样，剔除异常数据后共采集到 731 组有效数据，包括低速采样和悬停采样数据，其中在预设目标点的悬停采样数据采用每次继续航行前的倒数第 2 组数据，并按实时位置更新经纬度标记，部分数据结果如表 5 所示。由结果可见该水域各项指标稳定，水温为当季日间正常数值，pH 值 7.0～8.5 符合石斑鱼养殖弱碱性水质要求，浊度略高，仍在养殖池排水浊度范围内[40]，可采用适当措施进行处理。

表 5　养殖水域水质测量结果

Tab. 5　Results of water quality measurement in aquaculture area

采样数据序号	纬度	经度	水温/℃	pH 值	浊度/NTU
1	29°53′21″	122°22′25″	23.37	7.18	124
2	29°53′21″	122°22′25″	23.51	7.39	121
3	29°53′22″	122°22′25″	23.44	7.44	117
4	29°53′22″	122°22′25″	23.21	7.52	128
5	29°53′22″	122°22′25″	23.05	7.13	124
6	29°53′23″	122°22′24″	23.77	7.21	119
7	29°53′23″	122°22′24″	24.15	7.55	112
8	29°53′24″	122°22′25″	23.52	7.47	116
9	29°53′24″	122°22′24″	24.01	7.41	113
10	29°53′24″	122°22′24″	23.78	7.52	116
11	29°53′25″	122°22′25″	23.31	7.41	120
12	29°53′25″	122°22′24″	23.25	7.44	113
13	29°53′25″	122°22′23″	23.97	7.49	115
14	29°53′26″	122°22′23″	23.66	7.31	119
15	29°53′26″	122°22′24″	23.54	7.58	122
16	29°53′26″	122°22′23″	24.43	7.82	111
17	29°53′27″	122°22′22″	23.87	7.51	108
18	29°53′27″	122°22′23″	23.31	7.93	112
19	29°53′27″	122°22′23″	22.83	7.54	114

航点选取时遵循了航线不交叉原则，使动态测量不重复采取同一范围的水质信息以提高运行效率，并避开水域边缘置障较多的小范围区域。GPS

数据经 Matlab 处理得到的路径曲线总长约 725 m，计算动态路径覆盖面积时需去除所有拐点处的重复采样区域，总覆盖面积约为 6 700 m^2，达到水域面积的 68%。因此动态监测系统较为全面地均匀覆盖了养殖水域，系统满足养殖业水质监测要求，并具备异常检测能力。

4 讨论

本文设计的水产养殖动态水质监测系统为当前系统覆盖范围受限的问题提供解决方案。基于 WSN 的监测系统在应用时均需考虑网络管理困难、资源使用不均衡等问题[41]，扩大网络规模时以上问题愈加突出，因此需合理选择监测节点位置，可参阅清华大学设计的 GreenOrbs[42] 和弗吉尼亚大学设计的 VigilNet[43] 等成熟的 WSN 设计范例。如前文所述在水质监测系统中节点采样数据可反映的监测范围有限，限制节点数量会进一步缩小网络覆盖范围，造成迟检和漏检，并影响系统监测效果。本文设计的动态监测系统采用与 WSN 相似的监测流程，无人船平台作为动态监测节点兼具移动能力和监测功能，通过水面巡航采集大面积水域的水质数据，与无线传感网中的固定监测节点相比可解决监测范围约束，为自动无人船制定相应行船策略可满足不同的监测要求。

对动态监测系统的研究将不止于此，考虑恶劣天气对行船的影响，将进一步改进自动无人船以满足更长期的监测需求。当前无人船采用 LoRa 协议通信，可将自动无人船作为动态 LoRa 节点接入静态 LoRa 监测网络实现组合监测，仅在水域内代表性位置处，如入水口及排水口处部署固定监测节点，而在其他水域通过自动无人船定时巡航采集水质数据，有效降低监测网络规模并降低部署成本。除此以外，在池塘养殖等环境中应用时，若水域面积过大或有数个水域同时发起监测需求，可采用多船通信的联合监测系统，进一步提升监测效率。

当前系统中实现的自动无人船面向养殖区域实际监测需求进行了成本控制，在满足监测精度、保证监测可靠性的基础上精简了船体设备，目前整船硬件成本约 1 200 元，若实现批量生产成本还可进一步降低。系统目前未搭载溶解氧传感器、盐度传感器等设备，若有更多水产养殖水质指标监测需求，可直接为其增设相应传感器。

5 结论

(1)设计了水产养殖水质动态监测系统，开发自动无人船、岸基控制台、手动遥控端和云监测平台等，制定了适用于水质监测和异常检测两种不同情况下的监测方案。动态监测系统测量水温、pH 值和浊度作为水质评价指标，结合运行状态信息进行监测，按照养殖要求确定水质状况。相比传统方案，动态监测系统得到的水温相对误差绝对值不大于 0.5%、pH 值相对误差绝对值不大于 1.43%、浊度相对误差绝对值不大于 4.9%，均在各传感器精度范围内，可满足监测需求。

(2)设计开发了适合在水产养殖环境下工作的自动无人船，作为动态监测节点进行水质数据采样，实现遥控航行，或依靠搭载的多传感器检测运行状态，通过运行路径规划算法实现自动航行。通过大量实验验证了在水域内以低速航行、悬停采样的方式能够满足系统监测要求，实现水质监测和异常检测，且系统运行稳定可靠。

(3)动态监测系统主要针对传统监测方法覆盖范围小、监测网络部署不灵活这两个问题进行改进，并避免出现拓扑结构复杂、网络可扩展性差和组网过程复杂等问题。拓展了物联网技术在农业工程领域的应用，为水产养殖业水质监测提供了新的解决方案，也是当前监测方法的有效补充，具有较好的应用推广价值。

参 考 文 献

[1] 农业农村部渔业渔政管理局，等. 2018 中国渔业统计年鉴[M]. 北京：中国农业出版社，2018.

[2] 李道亮，杨昊. 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(1)：1－20.
LI Daoliang, YANG Hao. State-of-the-art review for internet of things in agriculture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 1－20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180101&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.001. (in Chinese)

[3] 刘兴国. 池塘养殖污染与生态工程化调控技术研究[D]. 南京：南京农业大学，2011.
LIU Xingguo. Study on the pond aquaculture pollution and ecological engineering regulation techniques[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese)

[4] 宋超，孟顺龙，范立民，等. 中国淡水池塘养殖面临的环境问题及对策[J]. 中国农学通报，2012，28(26)：89－92.
SONG Chao, MENG Shunlong, FAN Limin, et al. Environmental impact and countermeasures of freshwater fishpond aquaculture in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(26): 89－92. (in Chinese)

[5] 尹宝全，曹闪闪，傅泽田，等. 水产养殖水质检测与控制技术研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报，2019，50(2)：1－13.
YIN Baoquan, CAO Shanshan, FU Zetian, et al. Review and trend analysis of water quality monitoring and control technology in aquaculture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 1－13. http://www.j-csam.

org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? file_no = 20190201&flag = 1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 02. 001. (in Chinese)
[6] 段青玲,刘怡然,张璐,等. 水产养殖大数据技术研究进展与发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(6):1 - 16.
DUAN Qingling, LIU Yiran, ZHANG Lu, et al. State-of-the-art review for application of big data technology in aquaculture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 1 - 16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20180601&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.001. (in Chinese)
[7] 王魏,郭戈. 基于随机配置网络的海水养殖氨氮浓度软测量模型[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(1):214 - 220.
WANG Wei, GUO Ge. Soft measurement model for ammonia nitrogen concentration in marine aquaculture based on stochastic configuration networks[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 214 - 220. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20200123&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.023. (in Chinese)
[8] 施珮,袁永明,匡亮,等. 基于 EMD - IGA - SELM 的池塘养殖水温预测方法[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):312 - 319.
SHI Pei, YUAN Yongming, KUANG Liang, et al. Water temperature prediction in pond aquaculture based on EMD - IGA - SELM neural network[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 312 - 319. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20181137&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.037. (in Chinese)
[9] 叶章颖,鲍伟君,张丰登,等. 多台转鼓式微滤机多模式控制系统设计与实验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(3):334 - 340.
YE Zhangying, BAO Weijun, ZHANG Fengdeng, et al. Design and experiment of multi-mode control system of multiple microscreen drum filters[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 334 - 340. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20180341&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.041. (in Chinese)
[10] 万传飞,杜尚丰,赵亮,等. 基于 WSN 的水产养殖环境监测系统[J]. 农机化研究,2010,32(2):170 - 173.
WAN Chuanfei, DU Shangfeng, ZHAO Liang, et al. Aquaculture field environmental monitoring system based on WSN[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(2): 170 - 173. (in Chinese)
[11] DONG J, WANG G, YAN H, et al. A survey of smart water quality monitoring system[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(7): 4893 - 4906.
[12] 黄建清,王卫星,姜晟,等. 基于无线传感器网络的水产养殖水质监测系统开发与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(4):183 - 190.
HUANG Jianqing, WANG Weixing, JIANG Sheng, et al. Development and test of aquacultural water quality monitoring system based on wireless sensor network[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(4): 183 - 190. (in Chinese)
[13] ENCINAS C, RUIZ E, CORTEZ J, et al. Design and implementation of a distributed IoT system for the monitoring of water quality in aquaculture[C]//2017 Wireless Telecommunications Symposium (WTS). IEEE, 2017: 1 - 7.
[14] 刘雨青,李佳佳,曹守启,等. 基于物联网的螃蟹养殖基地监控系统设计及应用[J]. 农业工程学报,2018,34(16):205 - 213.
LIU Yuqing, LI Jiajia, CAO Shouqi, et al. Design and application of monitoring system for crab breeding base based on internet of things[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(16): 205 - 213. (in Chinese)
[15] CHEN J H, SUNG W T, LIN G Y. Automated monitoring system for the fish farm aquaculture environment[C]//2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. IEEE, 2015: 1161 - 1166.
[16] RAJU K R S R, VARMA G H K. Knowledge based real time monitoring system for aquaculture using IoT[C]//2017 IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC). IEEE, 2017: 318 - 321.
[17] 宦娟,吴帆,曹伟建,等. 基于窄带物联网的养殖塘水质监测系统研制[J]. 农业工程学报,2019,35(8):252 - 261.
HUAN Juan, WU Fan, CAO Weijian, et al. Development of water quality monitoring system of aquaculture ponds based on narrow band internet of things[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 252 - 261. (in Chinese)
[18] 金光,高子航,江先亮,等. 基于低功耗广域网的海岛水产养殖环境监测系统研制[J]. 农业工程学报,2018,34(24):184 - 191.
JIN Guang, GAO Zihang, JIANG Xianliang, et al. Environment monitoring system for island aquaculture based on low-power wide area networks[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 184 - 191. (in Chinese)
[19] 孙利民,刘伟. 对大规模传感器网络应用面临问题的思考[J]. 中兴通讯技术,2012,18(2):10 - 14.
[20] WIXTED A J, KINNAIRD P, LARIJANI H, et al. Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks[C]//2016 IEEE Sensors. IEEE, 2016: 1 - 3.
[21] KAPLAN E, HEGARTY C. Understanding GPS: principles and applications[M]. Boston: Artech House, 2005.
[22] GOLI H, MINAEI S, JAFARI A, et al. Comparison of four different methods for agricultural positioning using GPS and IMU [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2016, 4(2): 285 - 295.
[23] MURRAY D, LITTLE J J. Using real-time stereo vision for mobile robot navigation[J]. Autonomous Robots, 2000, 8(2): 161 - 171.
[24] MANLEY J E. Unmanned surface vehicles, 15 years of development[C]//OCEANS 2008. IEEE, 2008: 1 - 4.
[25] 李家良. 水面无人艇发展与应用[J]. 火力与指挥控制,2012,37(6):203 - 207.
LI Jialiang. Development and application of unmanned surface vehicle[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(6): 203 - 207. (in Chinese)
[26] LIU Z, ZHANG Y, YU X, et al. Unmanned surface vehicles: an overview of developments and challenges[J]. Annual Reviews in Control, 2016, 41: 71 - 93.
[27] MONK S. Raspberry Pi cookbook: software and hardware problems and solutions[M]. O'Reilly Media, Inc., 2016.
[28] 刘双印. 基于计算智能的水产养殖水质预测预警方法研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.
LIU Shuangyin. Prediction and early-warning of water quality in aquaculture based on computational intelligence[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)

(下转第 174 页)

2020.02.026. (in Chinese)
[21] 李丹, 张凯锋, 李行健, 等. 基于 Mask R-CNN 的猪只爬跨行为识别[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 261-266,275.
LI Dan, ZHANG Kaifeng, LI Xingjian, et al. Mounting behavior recognition for pigs based on Mask R-CNN [J/OL] Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 261-266,275. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2019s041&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.041. (in Chinese)
[22] HE Y, LIN J, LIU Z, et al. AMC: AutoML for model compression and acceleration on mobile devices[C]// Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018: 784-800.
[23] TAN M, LE Q V. EfficientNet: rethinking model scaling for convolutional neural networks[J]. arXiv Preprint arXiv:1905.11946, 2019.
[24] SANDLER M, HOWARD A, ZHU M, et al. Mobilenet v2: inverted residuals and linear bottlenecks[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 4510-4520.
[25] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 7132-7141.
[26] TAN M, CHEN B, PANG R, et al. MnasNet: platform-aware neural architecture search for mobile[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019: 2820-2828.
[27] TAN M, PANG R, LE Q V. Efficientdet: scalable and efficient object detection[J]. arXiv Preprint arXiv:1911.09070, 2019.
[28] LIN T Y, DOLLAR P, GIRSHICK R, et al. Feature pyramid networks for object detection[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 2117-2125.
[29] LIU S, QI L, QIN H, et al. Path aggregation network for instance segmentation[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 8759-8768.
[30] GHIASI G, LIN T Y, LE Q V. NAS-FPN: learning scalable feature pyramid architecture for object detection[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019: 7036-7045.
[31] LI X, CHANG D, MA Z, et al. OSLNet: deep small-sample classification with an orthogonal Softmax layer[J]. arXiv Preprint arXiv:2004.09033, 2020.
[32] LIU W, WEN Y, YU Z, et al. Large-margin Softmax loss for convolutional neural networks[C]// Proceedings of the 33rd ICML, 2016:507-516.

(上接第 185 页)

[29] NEO-7 u-blox 7 GNSS modules data sheet[EB/OL]. [2014-11-11]. https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-7_DataSheet_(UBX-13003830).pdf.
[30] LEE H W, CHEN X Z, TAN X H. The study of using arduino to control aircraft combined with obstacle avoidance warning function[C]//2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW). IEEE, 2018: 1-2.
[31] DE P L T, DE L V, PAIANO R. Sensor data collection and analytics with thingsboard and spark streaming[C]//2018 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS). IEEE, 2018: 1-6.
[32] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京:科学出版社,2006.
[33] PRATAQ M, PER E. Global positioning system-signals, measurements, and performance[M]. Massachusetts: Ganga-Jamusna Press, 2006.
[34] LOW Z N, LAW C L. Improving time to first fix for GPS receivers[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2015.
[35] PADEN B, ČAP M, YONG S Z, et al. A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2016, 1(1): 33-55.
[36] STEVEN M LaV. Planning algorithms[M]. London: Cambridge University Press, 2006.
[37] ADRIAN K, GARY B. Learning OpenCV3: computer vision in C++ with the OpenCV library[M]. Massachusetts: O'Reilly Media Inc., 2016.
[38] HIRSCHMULLER H. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(2): 328-341.
[39] 周喆. 水质条件对外来入侵生物水葫芦生长的影响[D]. 福州:福建农林大学,2008.
ZHOU Zhe. Effect of water quality on the growth of water hyacinth (*Eichhorniacrassipes* (Mart.) *Solms.*)[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2008. (in Chinese)
[40] 张浩. 集约化海水养殖废水多介质土壤滤层(MSL)与人工湿地技术处理效能的对比研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
ZHANG Hao. The comparative study of the performance between multi-soil-layering technology (MSL) and artificial wetland technology on treating concentrate aquaculture wastewater[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
[41] 钱志鸿,王义君. 面向物联网的无线传感器网络综述[J]. 电子与信息学报,2013,35(1):215-227.
QIAN Zhihong, WANG Yijun. Internet of things-oriented wireless sensor networks review[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(1): 215-227. (in Chinese)
[42] LIU Y, HE Y, LI M, et al. Does wireless sensor network scale? A measurement study on GreenOrbs[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2012, 24(10): 1983-1993.
[43] HE T, KRISHNAMURTHY S, LUO L, et al. VigilNet: an integrated sensor network system for energy-efficient surveillance [J]. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 2006, 2(1): 1-38.