

基于物联网与 GPS 的水上救援无人机设计

王紫涵¹, 刘昀晔^{2,*}

¹ 广西师范大学设计学院, 广西桂林, 中国

² 广西师范大学计算机科学与工程学院, 广西桂林, 中国

*通讯作者

【摘要】 本文阐述了一种将物联网 (IoT) 与 GPS 定位技术相结合的自主水上救援无人机系统的设计方案。该系统以无人机为主要平台, 并与水上机器人协同作业, 实现水上遇险目标的快速定位、智能巡航与高效救援。与传统救援装备相比, 该系统具有运行灵活、操作简便、响应迅速、成本低等优势, 有效弥补了现有水上救援体系的不足。通过模块化设计及自主控制算法集成, 该系统支持单人远程协同多台无人机作业, 显著提升水上救援的智能化与规模化水平。本研究成果可为中国现代化水上应急救援体系建设提供技术支撑与参考。

【关键词】 水上救援; 自主巡航; 无人机系统; 物联网技术; GPS 定位

【基金项目】 广西研究生教育创新计划项目 (编号: XYCBZ2024026)

1. 引言

无人水面舰艇 (USV), 通常称为水上机器人 (WaterRobot), 是一种主要用于军事领域作为靶船的无人舰艇, 由退役舰艇最初改装而成, 在民用用途上较为少见[1]。随着技术的发展, 无人船因其高机动性、速度快、自主性强及良好的环境适应能力, 逐渐被应用于民用领域, 如水上搜救、水质监测和水文调查, 显示出广阔的发展潜力[2]。

近年来, 中国在无人水面舰艇的研发方面稳步推进, 并取得了多个重要里程碑[3-5]。例如, 2008 年推出的天象一号为北京奥运会提供了气象保障服务。中国航天科工集团开发的“天象一号”系统在北京奥运会期间被用于气象服务与数据采集。当设备处于自主航行状态且检测到障碍物时, 可依靠内置传感器自动识别并调整航向、自主规划航线、采取躲避策略等多种方式感知周边环境。2013 年, “精海一号”: 是上海大学研制的试验型无人驾驶船舶, 用于算法开发和验证, 能在近海浅海区水文测量制图, 具有浅吃水 (0.43 米) 和高抗倾覆能力, 能安全在浅海区作业。2015 方洲系列实测无人船: 支持人工控制和卫星导航自主航行, 同时具备一定载荷能力, 由南方卫星导航技术有限公司与云洲智能联合研制。2016 年东南大学双桨双体结构无人船: 采用左右独立推进系统, 以推力差方式实现直航和转向功能, 但电力发展的关键是采用开环控制的电力推进和受限于速度和动力表现的开环控制, 因此, 在我

国目前国内还没有完全采用双桨双体结构无人船。2017 年最大航程 1000 公里, 艇长 12.2 米, 满载 7.5 吨, 由哈尔滨工程大学研制的大型无人驾驶船舶, 最高航速 50 节以上, 采用油电混合动力系统。环境认知系统融合雷达、可见光和红外传感器, 实现高精度目标跟踪和动态目标自主跟踪。但其体积大、吃水深、环境适应性有限。大连理工大学以变论域模糊 PID 控制为基础的无人驾驶船舶 2022 年。为了提高航向反应速度, 提出了航向追踪性能评估算法, 但研究仍停留在理论阶段, 只针对一些参数, 并未进行实船验证。这些发展显示了中国在自主海上系统方面的能力提升, 表明无人水面舰艇正朝着智能化、灵活化和高性能化方向发展, 并在科研与实用任务中应用潜力不断扩大。

2. 本研究概述

本文围绕无人机 (UAV) 应用展开, 设计了一种配备照明模块的水上救援装置。系统具备投放三枚救生圈的能力, 可显著改善救援作业的响应速度与成功率。此外, 将所研发的算法集成至无人机的自主飞行控制中, 实现了自主巡航任务的程序设计与功能验证。

2.1 研究主要贡献

解析与系统设计: 分析现有水上救援装备的不足, 提出适用于水上救援、无人机水上救护系统集成、照明等模块, 结合水上救援特点, 提高救援效率的无人机设计原理。找区域分解覆盖。根据查找区的凹凸不平处

理[6]提出凹多边形凸分解算法，以最优形态为基础，降低搜寻难度，便于任务规划。遍历优化：建立分解后的子区邻接表，确定进出场点，提出子区遍历策略，冗余路径最少，冗余路径减少，子区进出场排序。路径规划和覆盖增强：设计转弯方式和覆盖飞行策略，采用优化后的扫描航迹策略，以确保搜索区域覆盖完整、能耗降低并提升搜寻性能。该算法在无人机自主巡航控制程序中得以实现并整合了我们提出的算法，以实现覆盖搜索和路径规划功能。本研究提供了无人机水上救援操作的完整框架，结合系统设计、算法开发和实际实现，以提高水上搜救任务的效率与可靠性。

2.2 总体方案

本研究综合应用嵌入式系统设计、远程操控、GPS 定位、无刷直流电机驱动、传感器信息采集、舵机控制以及自动返航等关键技术，依据水上救援机器人的功能需求，提出并构建了完整的系统总体设计方案，为后续硬件与软件开发奠定了基础。系统如图 1

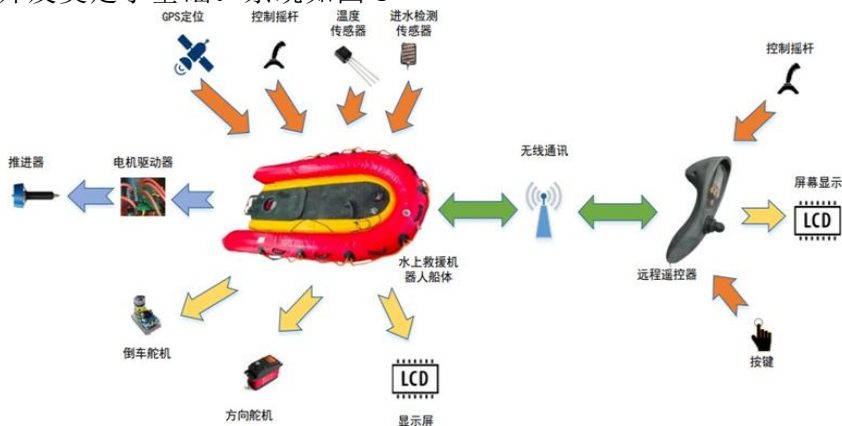


图 1.水上救援机器人系统

2.3 目标识别

在水上救援时，单靠人力来识别救援目标不仅会导致识别精度不足，而且随着无人机水上救援系统对目标识别技术需求的不断增加，这种方法在救援的实时性方面也显得不足。消耗了人力和时间，导致了救援的及时性下降[7]。目标识别既包括区分相似目标，也涉及对特定类型目标与其他类型目标的判别[8]。在水上救援系统中，核心任务是判断区域内是否存在目标，并准确区分待救援人员与其他对象[9]。为实现这一目标，无人机通常配备图像采集与传输模块，通过实时图像分析与识别算法，对捕获的数据进行处理。算法通过对数据集反复训练，不仅提高了识别精度和效率，还能够短时间内

所示：

（1）在系统总体方案的指导下，搭建水上救援机器人的硬件体系结构。具体包括电源模块、无线通信模块、GPS 定位模块、无感无刷直流电机驱动模块、舵机执行机构、液晶显示与人机交互模块、按键检测与控制模块等的电路设计与实现，确保硬件系统能够满足救援任务的综合性能要求。

（2）软件部分采用 C 语言作为主要开发工具，在 ARM 架构单片机平台上完成系统程序的设计与调试。通过模块化编程思想，实现了远程通信、定位导航、电机驱动、舵机控制、液晶信息显示、按键输入及自动返航等功能模块的协同运行，从而实现了整机的高效控制与管理。

（3）最后，对系统进行了全面的测试与验证。通过功能完整性检验与性能评估实验，对双端水上救援机器人的运动控制精度、响应速度以及环境适应能力进行了系统性测试，以验证系统设计方案的合理性与可靠性。

处理大量图像信息。与人工处理相比，自动识别方法显著缩短了分析时间，同时避免了人工疲劳问题，保证了搜索区域的全面覆盖与无遗漏检测[10]。由此可见，自动目标识别技术是无人机水上救援系统中的关键组成部分。图 2 给出了目标识别的基本步骤，包括图像预处理、特征信息提取与筛选、模型建立及目标匹配定位等过程，这些环节共同构成了完整的识别体系。

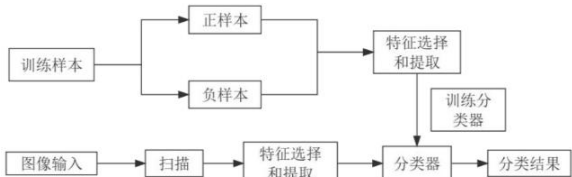


图 2.目标识别框架

3. 无人机与无人艇系统设计

主要介绍水上救援系统的硬件与控制平台设计，重点包括空中侦察与定位的无人机平台构建，以及负责近距离救援的无人艇自控返航系统。通过对两种平台的结构设计、功能配置及协同工作机制的分析，为后续的目标识别与救援任务提供稳定可靠的技术基础。

3.1 无人机平台设计

选用珠海翔顺智能科技有限公司生产的型号为 8006B 的六轴无人机为载体，根据水上救援的续航和负载需求，可实现 4 千米的飞行半径。此外，无人机还具备水面降落的功能，配备有浮子的支架使其能够在需要时安全降落于水面。浮漂可以保证无人机的安全，即使出现意外落水。该系统在安装高清摄像机及图像传输系统的同时，以六旋翼无人机为载体（见图 3），配备机载 GPS 定位设备，供落水人员具体位置使用。用户可通过手机 APP 对救援进展情况实时监控，做到看得远、看得清。



图 3. 无人机实拍图

此外，本系统通过手机应用与 GPS 定位模块的联合使用，实现了无人机飞行与救援区域的实时位置反馈。地面救援人员在通信信号覆盖范围内可获取精确的坐标信息，为救援工作的有序开展提供数据支持。系统工作原理如图 4 所示。

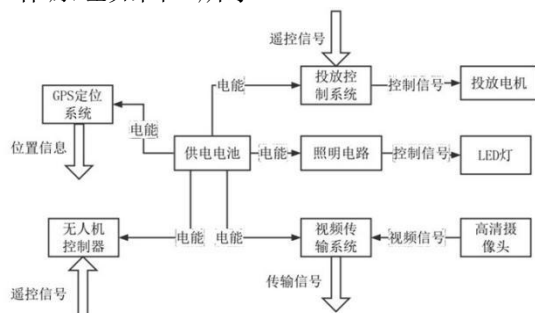


图 4. 水上救生原理图无人机

3.2 水上救援无人艇的自控返航系统

如图 5 所示，自动返航的水上救援机器

人通过无刷直流电机产生推进力，舵机则控制喷射通道的角度以完成航向修正。整个系统通过动力与舵向的协同作用实现自动返航，体现了驱动型舰艇的控制特征。

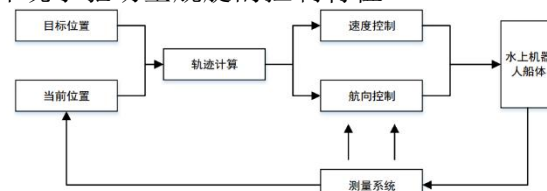


图 5. 自动返航的水上救援机器人原理图

4. 基于 YOLOv5 的水面目标检测实验与结果分析

主要介绍了基于特征关联学习的 YOLOv5 改进算法及其实验过程。首先阐述了改进模型的设计思路与网络结构；随后介绍了实验中所使用的数据集与预处理方法；最后通过训练结果与对比分析，验证了模型在水面目标检测任务中的有效性与优越性。

4.1 基于特征关联学习的 YOLOv5 水面目标检测

由于环境条件的不利，目标多样性很容易影响目标的侦测算法的精确性，环境条件的恶劣是造成目标侦测算法准确性的主要原因之一。图 6 表明，复杂环境下的水面反射、遮挡及气候变化会削弱模型的识别效果；此外，小型摄像头因载荷受限，使得系统的计算与能耗性能均受到约束。所以目标侦测算法的鲁棒性与实时性缺一不可算法算实时性是必要的。传统的目标探测手段，是覆盖不了复杂场景的。在多个自然影像目标侦测任务中，特别是 YOLOV5 取得了最优异的成绩，YOLOv5 系列演算法在目标侦测任务中的巨大优势得到了很好的发挥，精确的目标侦测算法为水上救援系统的实现奠定了可行的技术基础。

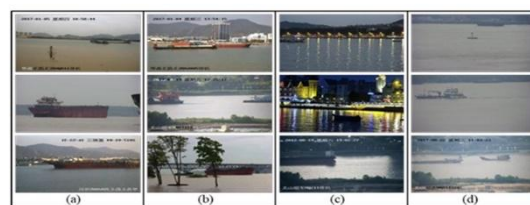


图 6. 各种物体大小的示例图片和水域环境不利的情况

然而，针对复杂环境下的目标检测，仍然面临两个亟需解决的问题：首先，检测算法需具备对多种形状、尺度及类别目标的综合学习能力，以增强特征感受范围。其次，应强化多尺度特征间的关联性，从而提升模

型在目标侦测任务中的稳定性与鲁棒性。基于此，本文提出了一种融合特征关联机制的改进型 YOLOv5 模型（FC-YOLO），并将其应用于小型水上救援无人船的目标识别任务中。为解决上述问题，本课题在空间相关特征提取的设计空间特征相关的 SFC 模块上做了两个方面的改进：一方面是用于特征设计的通道特征相关模块，用于通道相关特征的提取；另一方面是通道特征关联模块（CFC）旨在捕捉不同通道间的特征依赖关系，通过建模通道间的相关性，使网络能够更好地适应复杂多变的水域环境，实现多尺度特征的有效融合。该设计方案是在自建数据集 WSODD-DP 上经过大量实验验证后形

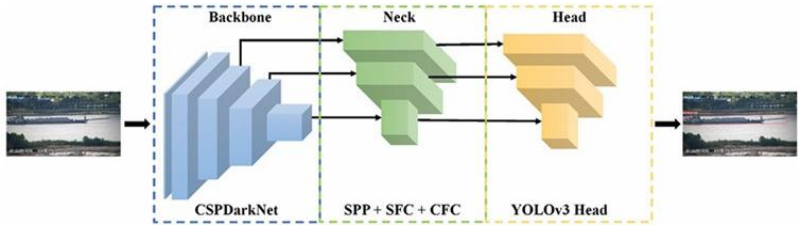


图 7.FC-YOLOv5 的示意图

4.3 数据集

目前尚缺乏公开可用的水域救援目标检测数据集，因此本研究通过自主采集与网络收集相结合的方式，构建了名为 Drowning-Person 的专用数据集，以满足溺水目标识别与检测算法的训练需求。该数据集共包含约 1000 幅失水者图像，覆盖自然水域（如湖泊、河流）与人工水域（如池塘、水池）等多种场景。数据采集过程主要通过模拟溺水者开展实景视频录制，并对视频进行分帧提取，初步获得 495 幅符合要求的图像。这些样本涵盖晴天、阴天、白天及傍晚等不同光照与气象条件。然而，由于部分样本在相似环境下重复采集，且模拟者动作存在一定主观性，与真实落水姿态仍存在差异，导致数据集在多样性与真实性方面存在一定局限。为弥补上述不足，本研究进一步通过网络渠道扩充数据集，选取来自新闻报道、应急监控及网络视频平台的真实落水影像，从而提升数据的代表性与真实性。经多源整合后的 Drowning-Person 数据集，能够更全面地反映不同水域、时段及天气条件下的溺水场景，为后续的救援识别算法训练提供可靠支撑并有涉及河湖海水库各水域的不同环境；丰富的天气和时间保证了资料集的多样性，典型的 Drowning-Person 资料集如图 8 所示，该资料集的种类、地点等都得到了丰富。采用

成的最终结果。在水面目标检测任务中，FC-YOLO 获得了 80.70% 的 MAP，证明它的有效性和优越性。

4.2 FC-YOLO 网络结构

如图 7 所示，FC-YOLO 网络总体结构由三个核心部分组成：特征提取主干网络、特征细化中间层以及目标检测预测层。为在复杂水域环境下实现更高精度的目标识别，本文引入了空间特征关联模块（SFC）与通道特征关联模块（CFC），以强化特征间的相关性建模并实现多尺度特征的高效融合。同时，对无人艇（USV）的目标检测性能进行了针对性优化，以提升整体识别精度与稳健性。

label 标识对采集到的图像标注落水人员的类别、地点等进行标注。



图 8.Drowning-Person 数据集示例

4.4 训练结果

该神经网络预装了 CUDNN11.0 和 CUDA11.1，显卡型号为 GeForce RTX3090，显存为 24GB。在服务器上使用 Pytorch 框架的 1.9 版本完成了训练。设置 350 期集训，每次集训样本个数为 16 个。表 1 所示为具体训练参数的设定。

表 1.训练参数

参数名称	参数
初始学习率	0.001
动量	0.92
Epoch	350
BatchSize	16

为了验证性能，使用了 mAP 作为主要的测量指标。mAP 指的是平均平均精度。mAP 是所有类别的统一步长为 0.05 的 [0.50,0.95] 范围内，所有 10 个交叉点的联合

(U) 的平均值, 它被作为排名的主要指标。训练结果如图 9 所示:

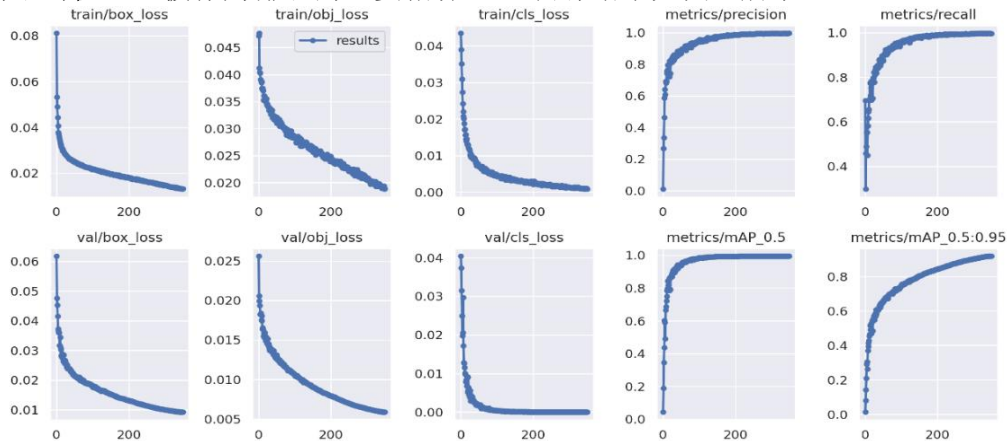


图 9.训练结果图

通过训练结果可以发现 FC-YOLO 的效果比最好。业绩增长明显。在 MAP 指标上达到 98.3%, 遥遥领先于其他车型。这说明该机型在图像中能够准确地探测和识别目标, 在目标探测任务中具有极高的精确度。FC-YOLO 在保持高精度的基础上, 通过优化结构来降低参数数量和计算量, 进而提高了计算效率。这使得该模型不仅能在高性能计算平台上表现出色, 在低功耗设备上也有良好

的表现。

4.5 实验结果

通过多次下水试验验证了无人驾驶船舶目标探测算法的性能, 并对救援过程及相关问题进行了分析。如图 10 (a) 所示, 无人艇能较稳定地沿预定路径航行, 但图 10 (b) 显示, 其航迹仍会因风向及通信波动等因素产生偏移。

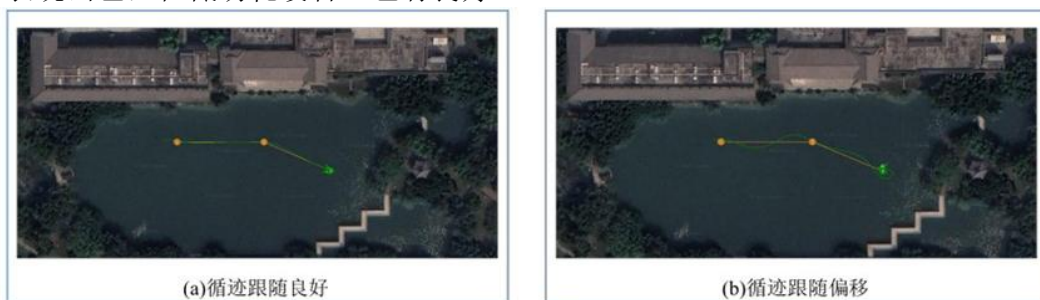


图 10.无人飞行器路径跟踪特性示意



图 11.救援流程关键步骤的模拟可视化结果

图 11 展示了水上救援系统在模拟实验中的操作过程及各步骤的执行效果。如图 11 (a) 所示, 首先将经过地面测试的无人驾驶小艇投放至湖中, 并按照预定任务指令航行至指定目标区域。随后, 如图 11 (b) 所示, 无人艇进入自主巡航阶段, 沿规划航迹执行模拟救援任务。本实验中, 巡航路径设定为绕湖一周的正方形轨迹。在自主巡航过程中, 感知与估测模块的摄像系统实时监控周边环境, 并将目标检测概率与实验设定的阈值 0.5 进行对比。基于压缩模型与综合模型对“DrowningPerson”类别的检测精度, 当系统识别到疑似落水人员且检测概率为 0.58 (高于阈值) 时, 如图 11 (c) 所示, 系统将计算无人艇与目标之间的世界坐标, 并即时将信息发送至控制与路径规划模块, 以便重新规划航线。整个任务企划及轨迹上传过程均通过模块化控制系统完成, 实现无人艇的自动响应和任务执行。

推进器通过接收控制模块根据目标航迹生成的舵角与推力指令, 实现航向与速度调整, 以确保无人驾驶的小艇沿着预定路线到达目的地。从图 11 (d) 左上角的实时地图中可以观察到, 无人驾驶的小艇正在调整自主巡航的航向, 以前往落水人员所在位置。如图 11 (e) 所示, 当气泵救生圈达到落水人员附近 (1 米以内) 时, 无人船将其释放, 并在接触水面后膨胀。图 11 (f), 最后落水者抓救生圈, 抢救成功者。

5. 结论

本作品以无人机平台为基础, 将照明及多次救生圈的投放功能集成起来, 以显著提高水上救援效率和成功率, 设计了一套自主巡航水上救援系统。在飞行控制上, 优化了

无人机的转弯与路径规划, 实现了无遗漏覆盖搜索与节能航迹优化。系统融合了嵌入式控制、GPS 定位、远程通讯与自动返航技术, 完成了软硬件一体化设计与实现, 经测试具备稳定的双端控制与可靠的救援性能。

参考文献

- [1] Bae I, Hong J. Survey on the developments of unmanned marine vehicles: Intelligence and cooperation[J]. Sensors, 2023, 23 (10): 4643.
- [2] 曹德胜. 关于“陆海空天”一体化水上交通运输安全保障体系构建的初步思考[J]. 水上安全, 2022, (04): 1-7+25.
- [3] 沈杰, 李小军, 柏杨, 等. 基于 MBSE 的水面无人艇装备保障体系研究[J]. 舰船科学技术, 2025, 47 (06): 76-81.
- [4] 董妍妍. 基于模型预测的水面无人艇轨迹跟踪控制研究[D]. 大连海事大学, 2024.
- [5] 唐意成. 水面无人艇动态避碰方法研究[D]. 沈阳理工大学, 2024.
- [6] 段海滨, 张岱峰, 范彦铭, 等. 从狼群智能到无人机集群协同决策[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49 (01): 112-118.
- [7] 蔡文鹏. 多功能水翼复合小水线面无人艇的初步设计分析[D]. 江苏科技大学, 2021.
- [8] 顾长伟. 水上应急救援关键装备技术现状与发展[J]. 水上安全, 2023, (02): 131-133.
- [9] 程广旗, 从政, 吴智强. 基于人性化理念的水上救援无人机设计[J]. 工业设计, 2024, (07): 40-43.
- [10] 宋杰, 闻佳. 无人船技术在海事的应用[J]. 中国海事, 2015, (10): 47-50.