

# 基于无线数传技术的无人船控制系统设计与实现

罗 淦<sup>1,3</sup>, 余华兵<sup>1</sup>, 余海瑞<sup>2</sup>, 吴文凭<sup>3</sup>, 肖宇峰<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 青岛创新发展基地, 山东 青岛 266000;

2. 中国船舶集团有限公司 系统工程研究院, 北京 100000;

3. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 612000)

**摘要:** 针对于现有的无人船 (unmanned surface vehicle) 存在的问题, 为提高其控制行驶最大距离, 设计一种以无线数据传输模块为传输介质的系统, 传输下位机与上位机之间的数据; 从激光雷达的二维扫描图像信息, 根据 SLAM (simultaneous localization and mapping) 算法制作出水面环境的栅格地图圈定卫星地图盲区, 组合多种传感器定位的方式估算无人船相对位置并定位在卫星离线地图, 以达到按路径规划行进的目的; 设计了上位机软件和基于 STM32 的控制器; 无人船位姿信息发送到上/下位机, 上位机得到信息向下位机传输实现远程遥控行驶的目的; 实验结果表明, 与常规的网络信号发射和接收传输数据不一样, 在无网络基站环境中仍能够在 1 200 m 以内保持良好的远程控制, 证实了系统的可靠性和准确性。

**关键词:** 无人船; 无线数据传输; 路径规划; 栅格地图; SLAM

## Design and Implementation of USV Control System Based on Wireless Data Transmission module

LUO Gan<sup>1,3</sup>, YU Huabing<sup>1</sup>, YU Hairui<sup>2</sup>, WU Wenping<sup>3</sup>, XIAO Yufeng<sup>3</sup>

(1. Harbin Engineering University Qingdao innovation and development base, Qingdao 266000, China;

2. System Engineering Research Institute of China Shipbuilding Corporation, Beijing 100000, China;

3. School of information engineering, Southwest University of science and technology, Mianyang 612000)

**Abstract:** Aiming at the problems existing in current unmanned surface vehicle (USV), in order to improve its maximum driving distance, a transmission medium system with wireless data transmission module is designed to transmit the data between lower computer and upper computer; From the two-dimensional scanning image information of laser radar, a simultaneous localization and mapping (SLAM) algorithm is used to generate the grid map in the water surface environment, and the relative position of unmanned ship is estimated by combining multiple sensors positioning methods, and the position of grid map is constructed to achieve the goal of path planning; The software framework and the controller based on STM32 are designed; The position and attitude information of unmanned ship is sent to the upper or lower computer, and the upper computer receives the information, and transmits it to the lower computer to achieve the purpose of remote control driving; The experimental results show that, unlike the conventional network signal transmitting and receiving transmission data, the system can still maintain the good remote control distance within 1 200 m in the environment without a network base station, which confirms the reliability and accuracy of the system.

**Keywords:** USV; wireless data transmission; path planning; grid map; SLAM

## 0 引言

无人船发展至今已有 70 多年的历史随着工业技术的进步, 人类对无人遥控设备的需求越来越大<sup>[1]</sup> 船舶的自主的航行有着十分重要的战略层面的意义, 由于无人船在全自主的控制的方式方法对于无人船的智能化的程度要求非常高, 无人船的智能化的实现非常的艰难。与传统船舶比起来, 无人船能够通过人员的控制系统与远程的一些遥控的一些设备能够在劳动的条件更加的优越的岸上环境之下进行一系列的实时的操作, 通过这些操作设备从源头上减去

人为的因素对船舶的运行的安全的影响<sup>[2]</sup>。

由于科学技术的进展, 有关无人船的科学研究的日益引起世界各国的高度关注, 而长距离或者超远距离的数据通信也一直是无人船关键技术研发的重要课题, 而以往的无人船控制系统大多通过设备的无线电接收机接收由地面遥控器发送的信息, 而这种系统方法不但有效防止相距过近, 同时易于引起干扰。针对于该问题, 设计了将通道信号经由无线数传模块从无人船发送端, 接受端得到信号端的通讯系统<sup>[1-4]</sup>。

同时系统如果要在水面环境中完成控制者的安排, 自

收稿日期: 2022-07-18; 修回日期: 2022-08-29。

基金项目: 哈尔滨工程大学 2021 年度青年教师启动经费项目(79000003)。

作者简介: 罗 淦(1997-), 男, 四川人, 硕士研究生, 主要从事自动控制, 通信方向的研究。

通讯作者: 余华兵(1975-), 男, 湖北人, 教授, 主要从事信号处理方向的研究。

引用格式: 罗 淦, 余华兵, 余海瑞, 等. 基于无线数传技术的无人船控制系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(3): 134-139.

主导航是不可缺少的关键环节。目前阶段我们可使用到的自主导航方式有: 惯性导航、天文导航、特征匹配等<sup>[3]</sup>, 但是如果只是单一的使用一种导航方式进行导航, 在实际应用上效果往往达不到预期的想法, 因此一般使用组合导航方式, 用以更精确地完成导航效果, 其次为了使无人船在规划的路径上稳定运行, 提高准确性需要对控制方法进行比较分析。当前常用的控制方法或多或少存在一些不足, 所以在实际应用中还需要将这些方法做些改进<sup>[4]</sup>。

本次实验以自主导航配合无线传输技术远程遥控, 设计出一种能在中长距离自由切换控制方式的一个无人船控制系统, 在测试实验中取的很好的效果。

## 1 系统结构及原理

本次实验的无人船控制系统采用了工业控制系统计算机和 STM32 单片机来做为 控制器共同组成的下位机主控制器, 上位机为 STM32 单片机, 外围设备包括无线传输模块 (数传和图传)、电源管理模块、操舵装置与驱动模块、舵机模块、舵机模块, 激光雷达以及摄像头等, 并且提供一个基于开源软件框架的上位机监控软件, 另外还包括电源管理模块: 通过稳压电路产生 16 V, 5 V 以及 3.3 V 的电压, 为系统各个模块提供安全稳定的电压, 保证电路正常工作。舵机的驱动模块可以通过转 16 V 直接进行电源供应, 而工控机和单片机的电源可以经过稳压电路直接转入 12 V 或者 5 V 电源。基本设计框图, 如图 1。

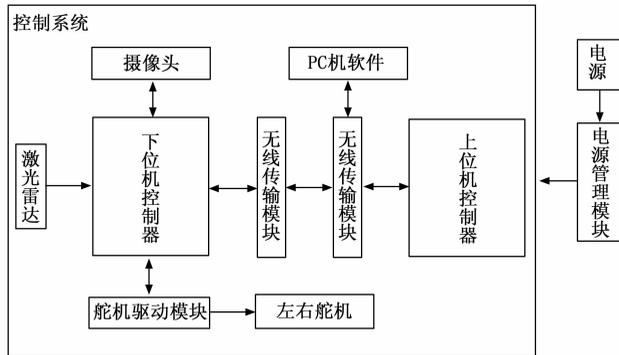


图1 系统设计框图

无人船在一个完整的控制测试过程中主要完成以下流程。

本次实验使用的无线传输模块分为数传和图传, 通过工业级无线数传模块, 上位机控制系统能够远程访问无人船终端, 使其执行控制和数据反馈<sup>[4]</sup>, 通过无线图传模块传输图像回到上位机。在无人船路径规划上, 采用激光雷达采集无人船位姿信息, 回传到下位机控制器进行提取和处理, 在无人船运动控制方面, 为了实现转速和转角可控, 在推进器的控制上需采用 PID 算法和 PWM 定时器; 在上位机控制器和无人船下位机控制器的通信方面上, 采用 RS485 通信接口, 以工业级无线数传电台来进行无线数据收发, 达到远程控制无人船的目的。

## 2 系统硬件设计

### 2.1 驱动结构设计

现阶段无人船为了适用于水面上的各种突发状况, 因此对于其的稳定性要求很高。无人船在其航行的过程中需要保证船体航行等一系列的因素, 让船的重量尽可能的分布均衡, 使其重心尽量偏低且居中, 以此来防止在航行的过程中遇到水流变化而发生侧翻的情况。根据技术指标和最高航速规定可知, 该实验无人船为中低速船舶。这一类的内河行船通常有二个选择: 平底船和折角船。折角线体制造的工序较为繁琐, 且在相同容积下舱容较小, 稳定性不足, 也不够经济; 平底方型线体制造工序较为简化, 而且舱口容量比较丰富, 舰型更加稳定。综合考量无人船稳定性和布置地位, 选用平底方型线体比较合理<sup>[5]</sup>。对双舵装置的舰艇而言, 在航行过程中往往需要将双舵同时, 而双舵同时运转最简便、最安全的方式就是用一个推舵机构, 利用连杆机构推动二舵柄同时运转, 但仅适合于双舵相距近、单机运行功率小、载荷差别小的情况场合<sup>[6]</sup>综合考虑采用平底双舵机控制来完成本次实验。

### 2.2 激光雷达/GPS+IMU 惯导

在本次实验的地图建立时, 使用激光雷达扫描周围环境信息, 对无人船定位则采用的是 GPS (global positioning system) + IMU (inertial measurement unit) 的组合惯导模型, 雷达能有效检测距离为以雷达为中心的一定范围环境, 它本身能进行三维立体图构建但因为三维地图建立占用资源太多, 且本次实验可近似为在二维平面上运动故本次实验使用二维扫描。在路径设计上相对于光学系统, 激光雷达容易掌握, 运用方便, 而且对周围环境的影响作用较小, 配合 GPS+IMU 组合系统对无人船位置的定位, 能让无人船对周围环境进行扫描并对自身位置进行定位。

### 2.3 无线传输模块

进行无线数据传输时, 使用两种无线传输模块, 为区分以下分别称为工业级无线数传模块和无线图传模块: 其中无线数传模块的工作频段为 425~450.5 MHz, 出厂默认是 433 MHz, 传输距离达 3 km; 通信接口有 RS232 和 RS485 两种, 波特率支持 1 200~115 200, 出厂默认 9 600; 工作电压为 12 V。无线图传模块的工作频段为 5.8 G, 视频码率和工作带宽为 1~300 MHz, 延时约为 10 ms (仅图传), 接收机 5 dBi 天线时传输距离可达 1~3 km; 工作电压为 DC12~24 V, 能使无人船的控制距离在原有的基础上扩大, 使无人船能使用的领域更加宽广。

### 2.4 推进器及其驱动模块

本次设计采用两个推力器做为无人船的动力来源, 它所采用的新设计包括了一个全浸没型无刷推进器, 该推进器内带有封装的调节推进器绕组温度和定子, 以及涂层的磁石和转子。推进器的主体结构 and 螺旋桨均由坚硬的聚碳酸酯塑胶所制造, 而仅有的裸露金属部分则由船用不锈钢制造。与之前的推进器相比, 全淹没设计是独一无二的。它允许对推进器进行水冷和对塑料衬套进行水润滑。它消

除了对轴封,电磁联轴器以及充满空气或机油的隔室的需要,从而使推进器具有自然的耐压性。设计紧凑,部件数量最少,因此可以以可承受的价格使用它。

其对应的推进器驱动器上面包括了 6 个端子,分别是 4 个编码器控制端子,用来驱动推进器;以及两个脉冲信号端子,通过信号控制推进器的转角。这 6 个端子加起来一起控制无人船的运动状态。

## 2.5 摄像头模块

无人船的视频回传采用 720 P 摄像头,支持 60 帧视频回传,720 P 摄像头模块的分辨率不是很高,它的最大图像尺寸仅是  $1\,024 \times 768$  像素,因此所需回传数据相较于其他摄像头较少,很适合远距离监控,本次实验使用该模块主要目的为测试无线图传模块传输的稳定性。

## 2.6 电源模块

电源管理是整个操作系统正常运行的前提基础,就像人的寿命一样,一个好的电源和电源管理就好比人有了一个好身体,所以在设置电源部分之前就需要单独的对电源线路进行设置,并且在选用电源模块时,还必须充分考虑实际使用的电源情况。电源模块包括 48 V 电源箱和稳压模块。电源箱供电电压稳定。本次各个模块需要供电的范围在 3.3~16 V 之间,需要转化的电压较多,因此电源箱很适合本次实验各模块的供电需求。

## 2.7 基于 STM32 的上位机控制器

本文选用单片机作为系统主机的主控制器,在芯片选择的时候需要考虑以下一些因素:系统外围的电路非常多,芯片的 I/O 口数量一定要能够满足使用的需求。本系统设计选型采用了 STM32F103ZET6 芯片,用作控制主机的主控件。STM32F103ZET6 为 32 位处理器芯片,使用了 ARM 公司的 Cortex-M3 内核,最大运行时间为 72 MHz,运行电压区间为 2.2~3.6 V,能够运行在  $-40 \sim 105$  °C 的工作温度范围,通过一系列的省电模块保证了低功耗使用的需求,绘制 PCB 原理图如图 2 所示。



图 2 基于 STM32 的上位机控制器 PCB

## 2.8 下位机控制器

下位机控制器采用工控机和 STM32 单片机相结合。工控机可以通过收集激光雷达的信号对回传无人船的位姿信息加以处理,并将信息传递给 STM32 单片机,工控机具有设计简洁清晰、扩展功能强大、开源性较好的优点。只需要熟悉各个硬件架构和应用基本理论便可简单应用多个功

能,同时实现跨平台发展,所以使用非常广泛。

## 3 系统软件设计

### 3.1 软件总体设计

软件总体设置主流程图,如图 3。首先完成对每个运行系统的初始化,分配资源后摄像头采集信息发送至 PC (personal computer) 机软件是否手动控制无人船(本次实验需事先让无人船在实验场地行驶描绘出场地地图),之后组合传感器采集无人船位姿信息发送给工控机处理,检查是否按程序路线行驶,若有偏移,则通过对推进器转速的修正使其继续按路线行驶,直到到达终点。

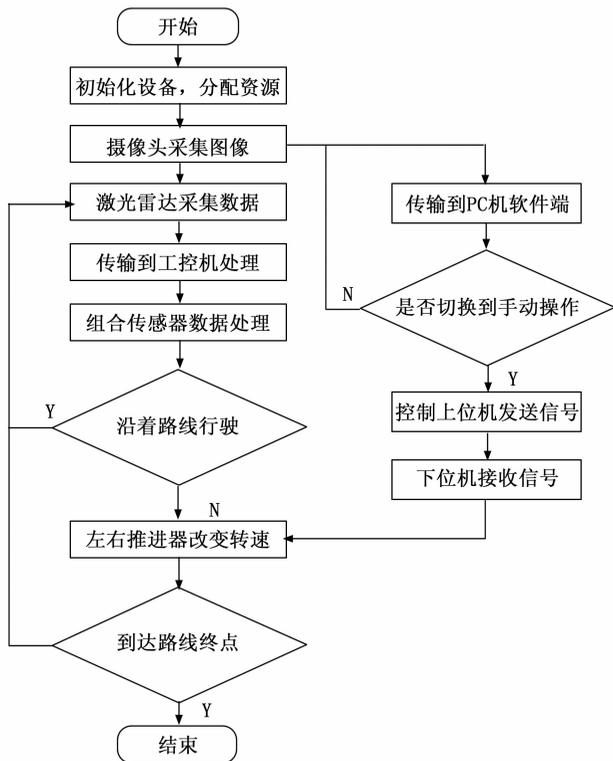


图 3 软件总体设计主流程图

### 3.2 地图规划

定位系统和地图的构建 (SLAM) 是移动机器人技术发展中的问题,难题,是移动机器人在未知条件中进行主动导航的理论基础。激光雷达和光学感应器是 SLAM 领域的两种主要传感器,而近年来基于激光雷达和光学感应器传感器的 SLAM 技术也获得了更广泛的发展与应用<sup>[7]</sup>,其中激光雷达相较于视觉传感器使用方便构建简单。

本次实验中使用了激光雷达制作水面环境圈定卫星地图盲区,激光雷达所构建的是一种信息含量较小的栅格地图,栅格地图易于创建且生成速度快,更重要的是无需向外界数据库请求信息,如图 4,为本次实验雷达建立的栅格地图示意图。它将周围环境分割成栅格的形式表示,栅格有白、灰和黑 3 种状态,白表明该路径上无障碍物可通过,灰表明无法判别不明情况,黑则表明路径上有障碍物<sup>[7]</sup>。

本次地图的构建分为先后端两个步骤:地图的建立是

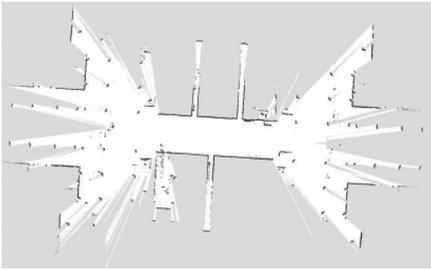


图 4 栅格地图

cartographer-SLAM 计算的最先端, 但是需要在地图建立的步骤中添加了子地图的定义, 先通过一系列的激光扫描方式, 使用扫描图相匹配的方式在最佳方位处建立出子地图, 再通过特定的持续时刻的扫描图相匹配方式<sup>[8]</sup>估算出无人船的相对位置, 如果激光扫描的区域图和距离过去的较近区域图匹配了, 那么在地图上就可以添加回环的约束, 通过估算出来的数据、相对时刻等, 也能建立起最先端的位置图; 其后端过程中进行的就是图的修改, 进而去调节无人船在过去时的位姿和子地图等信息, 其后端处理则是指利用分支界定法实现对位姿图像的闭环运算, 在出现情况后, 再将这个回环进行了一次非线性最小化二乘的优化过程求解解决, 然后再调整这个回环中的节点、边和子地图<sup>[9-10]</sup>, 图 5 为地图规划算法框图。

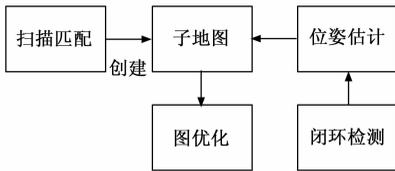


图 5 地图规划算法框图

本次的实验场地为水面平稳, 视野开阔无遮挡的河流, 为使地图构建效果更佳, 选取的实验场地为河岸较河面高度差较为明显处。

### 3.3 导航定位

在现有技术之中导航定位常见的易于实现的技术手段共有 3 种: 无线定位导航, GPS 定位技术以及组合导航定位技术, 组合导航定位技术能够弥补 GPS 定位技术使用种如卫星信号不足等缺陷, 且能反馈的信息量相对于前两者更为丰富<sup>[11]</sup>, 故本次的实验采用的是 GPS+IMU 的组合惯导完成位置的标定, 再根据定位信息和地图信息完成实验<sup>[12]</sup>。在无人船的位置定位模型中, 通过 GPS 和 IMU 组合系统将收集到的位姿信息回传到下位机控制器中, 因为回传的坐标信息是组合系统内部的空间坐标系称为地球坐标系, 需要将回传坐标转换到对应的地理坐标系下 (通常情况下地理坐标系和载体坐标系取相同), 再将船体方位与姿态信息结合到一起组成完整的位置坐标信息。组合系统上的位置坐标可用  $\varphi, \lambda, h$  三个参数表示, 其中  $\varphi, \lambda$  依次代表了纬度和经度 (从子午平面/本初子午面从赤道平面到该点的夹角),  $h$  表示高度, 这 3 个参数共同构建出了组合系统的坐标系。转换得到的地理坐标式也可由  $x, y, z$  三个参数表示,

可简单理解为以无人船重心为原点的空间直角坐标系, 其中  $x, y, z$  分别指向东, 北以及垂直向天的方向, 以下列出坐标系转换的计算公式, 如式 (1) ~ (3) 表示位置坐标在转换之后的模型上的关系, 其中  $Re\_L$  为地球长轴半径,  $Re\_S$  为地球短轴半径,  $e$  为偏心率, 计算方式如式 (5)<sup>[12-14]</sup>:

$$x = (N + h) * \cos\varphi * \cos\lambda \quad (1)$$

$$y = (N + h) * \cos\varphi * \sin\lambda \quad (2)$$

$$z = [N * (1 - e^2) + h] * \sin\varphi \quad (3)$$

其中:  $N$  为曲率半径,  $W$  为辅助系数:

$$W = \sqrt{(1 - e^2 * \sin^2\varphi)} \quad (4)$$

$$e = \sqrt{(Re\_L^2 - Re\_S^2)/Re\_L^2} \quad (5)$$

$$N = Re\_L/W \quad (6)$$

$$Re\_L = 6\ 378\ 137 \quad (7)$$

$$Re\_S = 6\ 356\ 863.018\ 8 \quad (8)$$

再经过量纲转换后, 收集在地图或坐标下的位置信息和在船舶偏航点的位置信息, 进行组合就能在地图上定位无人船的位置<sup>[15]</sup>。

### 3.4 路径规划

路径规划模块负责的是生成最优路径,  $A^*$  算法作为最常用的规划算法, 在目前规划中大都使用该算法进行操作, 基本思想为选取  $f(n)$  值中最小的节点作为相邻后置位要查找的节点, 逐个查找一直到找到目标节点<sup>[16]</sup>。代价值的式子如下所示:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (9)$$

$f(n)$  为点  $n$  于起始, 目标节点的代价值总和;  $g(n)$  为点  $n$  到起始节点实际的代价值;  $h(n)$  为点  $n$  到的目标节点估计的代价值, 其流程框图如图 6。

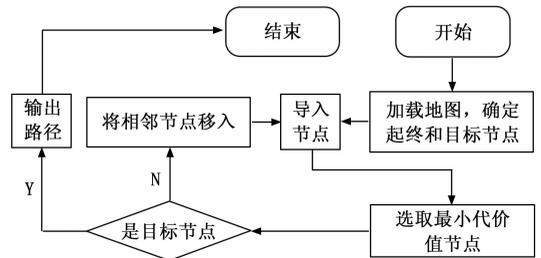


图 6 路径规划框图

### 3.5 PID 控制

PID 控制系统是利用对误差信息的比较、积分、导数计算的各种复合方式应用于各种系统的控制原理, 以便使误差趋向零。

PID 计算式如式 (10), 在其中  $e(k)$  表示本次偏差,  $e(k-1)$  表示前位相邻偏差,  $e(k-2)$  表示前隔位相邻偏差,  $P_{w\text{m}}$  表示增量输出,  $K_p, K_i, K_d$  分别代表比例增益, 积分和微分常数。

PID 调整, 主要是指调整微分时间常数  $T_d$ 、比例增益效果  $K_p$ 、积分时间常数  $T_i$  三种参量, 其传递函数为式 (11) 所示。该装置采用 PID 调节方法控制推进器, 其速度变动

相对稳定,且偏差较少,此时仅需要改变 PI 参数即可,包括比例增益效果和积分时间等常数<sup>[17]</sup>。那么,上式(11)可以简化成式(12)中所述:

$$Pwm += Kp[e(k) - e(k - 1)] + Ki \times e(k) + Kd[e(k) - 2e(k - 1) + e(k - 2)] \quad (10)$$

$$G(s) = U(s)/E(s) = Kp(1 + 1/(Ti \times s) + Td \times s) \quad (11)$$

$$Pwm += Kp[e(k) - e(k - 1)] + Ki \times e(k) \quad (12)$$

### 3.6 转向控制

在本文中的无人船舶采取双舵机驱动的方法推进船舶朝着目的地运行,这里我们假设无人船在一个 XOY 的坐标系中,规定船头朝向为 Y 轴正方向,右推进器为 X 轴正方向,规定好坐标系方向之后,根据左右推进器速度差实现对无人船方向的改变<sup>[18]</sup>,本次实验使用利用 Pwm 定时器通过设置占空比的方式调整每个阶段推进器的运行速度配合 PID 算法进行转向控制,其设计流程如图 7 所示。

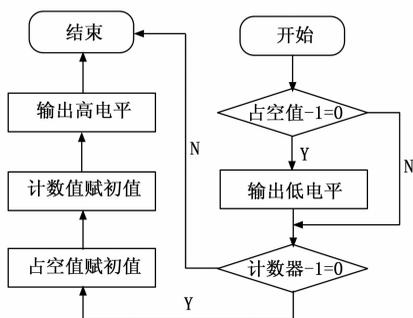


图 7 PWM 设计流程图

### 3.7 上位机软件设计

上位机软件是采用开源框架搭建的一个窗体软件,采用的是 C++ 语言,这款软件能在装有 Windows 系统的 PC 机或者工控机上稳定运行,且操作方便<sup>[19-20]</sup>。本上位机软件是由如下几个部分构成的。

- 1) 上线状态:当无人船与上位机软件收发数据正常时,软件会提示通信正常,并且显示无人船的当前转角,速度,工作状态,回传视频等信息,以便我们观察无人船情况。
- 2) 地图:软件会获取卫星地图,并通过收到信息定位无人船在地图上的位置,方便我们进行后续控制等一系列的操作。
- 3) 切换控制:可控制无人船切换为自主行进还是手动控制行进。
- 4) 其他可附加功能:留有可附件功能的界面,可添加其他如定位等的附属功能<sup>[20]</sup>。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 实验步骤和方法

- 1) 先搭载好船体,并查看外围设备是否和主要控制器稳定相连接。
- 2) 使用基于 STM32 的上位机控制器对无人船进行控制,在实验场地行驶绘制出实验场地栅格地图(为测试方

便,只建立了计划路线即包含行驶路径的栅格地图,未建立完整河道地图)圈定卫星地图盲区。

3) 选取合适的路线(由于河道部分地方河道弯曲且周围有障碍物阻挡,为了测试无线传输最好的效果,在选取路线时,通过划分区点分段式到达的方式行驶来规避上位机和下位机间的部分障碍物),通过上位机将行进指令发送到下位机控制器。

4) 事先在下位机控制器上设置自动回传的固定长字符串(共 28 位,开头三位分别为 000)。

5) 无人船行驶,在行驶过程中,每当无人船与起点直线距离行驶达到约 100 m 便向 PC 机软件监控端和控制器回传一次设置好的长字符串。

6) 记录长字符串反馈情况,并且汇总与文档中。

7) 在行驶过程中,每当无人船与起点直线距离行驶达到 200 m,PC 端便单独保存此 200 m 从摄像头回传的视频,然后记录该视频的效果。

### 4.2 实验数据

将记录的数据进行统计、处理,得到如表 1~2 所示的实验数据。

表 1 无人船接收到字符串效果<sup>1</sup>

起点终点直线距离 D/m	0.0	102	205	301	401	502	602	701	805
完整度	A	A	A	A	A	A	A	A	A
起点终点直线距离 D/m	904	1001	1103	1204	1311	1401	1502	1602	
完整度	A	A	A	B	A	C	A	C	

1:无人船接收到字符串效果完整度分成 A、B、C 三种等级,A:完整接收;B:遗失 1-10 个字节;C:遗失 10 个字节以上或无法接收到字节。

表 2 无人船回传视频效果<sup>2</sup>

起点终点直线距离 D/m	0~200	200~400	400~600	600~800	800~1000	1000~1200	1200~1400
效果	A	A	A	A	B	B	C

2:无人船的回传视频效果分为 A、B、C 3 种等级,A:视频正常无卡顿;B:视频正常无明显卡顿或无明显雪花干扰;C:视频雪花干扰和卡顿明显或无视频传入。(正常人肉眼观察无卡顿的视频帧数为每秒 24 帧以上,20 帧以下能察觉到明显卡顿)

### 4.3 数据分析

从表 1 中的信息表明,无人船中的数据信号传输随着初始距离的增加而变得越来越不稳定。当初始距离从 0 m 增加至 1 300 m 时,传输字节接收完整度稳定,几乎无缺失且能稳定接收,而超过 1 300 m 后接收字符完整度和稳定程度明显下降,甚至几乎无法接收到字符串。因此,当直线距离小于 1 300 m 时,无人船远距离控制较为稳定。

从表 2 中的数值表明,无人船回传视频的有效性随着起点与无人船的直线间距的增加而有所减弱,因为测试地为遮挡物较少地区,所以主要影响因素为距离。可以发现,起始距离在 800~1 200 m 范围内的,视频效果明显低于起始距离在 0~800 m 范围内的。另外,距离超过 1 200 m 时,

视频效果也衰减地比较明显甚至接收不到视频。

结合之前所查阅资料和以上测试的数据分析而得出, 当在环境开阔无遮挡物时航行距离直线长度在  $0 \sim 1\ 200\ \text{m}$  范围内时, 无人船的综合效能发挥良好。

## 5 结束语

本篇主要讲述了一种采用无线传输模块的无人船, 对无人船的硬件和软件设计部分作出了重点说明。经实验检查证明, 无人船能根据规划路线自动行驶, 同时在一定距离内能进行远程操控和反馈信息。此外, 无人船的总体稳定性尚有待继续改善且尚未在复杂环境测试, 主要可以通过提升相应硬件并继续优化软件设计来完成。由于该无人船成本较低, 性能优越, 通过简单改善就可以取代目前的一些自动化水平较低、售价却十分昂贵的无人船, 具有一定的实际使用价值, 因此具有一定的参考价值。

## 参考文献:

- [1] 杨何伍, 周 昕. 基于 STC8 的无人船遥控系统通讯实现 [J]. 广州航海学院学报, 2022, 30 (1): 1-4.
- [2] 周洪光, 马爱民, 夏 朗. 无人水面航行器发展 [J]. 国防科技, 2009, 30 (6): 17-20, 30.
- [3] 房新兵, 毛南平, 赵李健, 等. 基于捷联惯导的船载新型阵列雷达阵面姿态测量系统设计 [J]. 遥测遥控, 2021, 42 (2): 69-76.
- [4] 雷立动, 裴海龙. 基于无线数传模块的无人机通信系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (2): 460-463.
- [5] 陈 铭. 清漂无人船船体结构设计与优化研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
- [6] 刘 胜, 常绪成, 李高云. 船舶双舵同步补偿控制 [C]. //第 21 届中国过程控制会议论文集, 2010: 1631-1636.
- [7] 刘 留, 王煜尧, 倪琦瑄, 等. 一种基于博弈论的时序网络链路预测方法 [J]. 计算机研究与发展, 2019, 56 (9): 1953-1964.
- [8] WU J, SHEN J, ZHOU B, et al. General link prediction with influential node identification. [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2019, 523: 996-1007.
- [9] DONG E, LI J, XIE Z, et al. Bi-scale link prediction on networks [J]. Chaos Solitons Fractals, 2015, 78: 140-147.
- [10] 翟东升, 刘 鹤, 张 杰, 等. 一种基于链路预测的技术机会挖掘方法 [J]. 情报学报, 2016, 35 (10): 1090-1100.
- [11] SALAVATI C, ABDOLLAHOPOURI A, MANBARI Z, et al. BridgeRank: A novel fast centrality measure based on local structure of the network [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 496: 635-653.
- [12] 黄 璐, 朱一鹤, 张 巍. 基于加权网络链路预测的新兴技术主题识别研究 [J]. 情报学报, 2019, 38 (4): 335-341.
- [13] SHEIKHAHMADI A, NEMATBAKHSH M A, ZAREIE A. Identification of influential users by neighbors in online social networks [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2017, 486: 517-534.
- [14] BASTAMI E, MAHABADI A, TAGHIZADEH E. A gravita-

- [15] MORAVEC H, ELFES A. High resolution maps from wide angle sonar [C] // Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1985, 2: 116-121.
- [16] 齐继超, 何 丽, 袁 亮, 等. 基于单目相机与激光雷达融合的 SLAM 方法 [J]. 电光与控制, 2022, 29 (2): 99-102, 112.
- [17] 向可均. 自主巡航的无人船系统 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.
- [18] 付承彪. 导航定位技术研究 [J]. 科技视界, 2013 (34): 39.
- [19] 张树凯. 基于数据驱动的无人船航线自动生成 [D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- [20] 刘施菲. 激光雷达辅助的惯性导航组合系统技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [21] 晁 鹤, 郑恩让. 基于 STM32 的无人船控制系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (10): 129-133.
- [22] 贾茂良. 基于电子海图的无人艇路径规划 [D]. 天津: 天津理工大学, 2019.
- [23] 向可均, 肖宇峰, 胡长青, 等. 基于三维激光扫描的水面目标物体检测 [J]. 应用激光, 2019, 39 (4): 671.
- [24] 张 辉, 张瑞亮, 许小庆, 范政武. 基于关键节点的改进 A \* 无人车路径规划算法 [J/OL]. 汽车技术: 1-9 [2022-10-05]. DOI:10.19620/j.cnki.1000-3703.20220144.
- [25] 苏中滨, 张磊磊, 马 铮, 等. 基于改进 PSO 的二自由度 PID 的无人自转旋翼机飞行控制 [J/OL]. 农业机械学报: 1-13 [2022-07-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20211130.1235.002.html>.
- [26] 屠群锋. 船舶之间相互采取转向避让行动的分析 [J]. 浙江交通职业技术学院学报, 2001 (2): 43-46.
- [27] 李金科, 宋 洁. 基于数据采集系统的上位机软件设计 [J]. 信息技术与信息化, 2022 (5): 110-112, 116.
- [28] 张 青, 任 宏. 智能人机交互通信系统设计与实现 [J]. 现代电子技术, 2018, 41 (20): 175-178.
- [29] tion-based link prediction approach in social networks [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2018, 44: 176-186.
- [30] GROVER A, LESKOVEC J. node2vec: Scalable Feature Learning for Networks [C] // Acm Sigkdd International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. ACM, 2016: 855-864.
- [31] CAO S, WEI L, XU Q. GraRep: Learning Graph Representations with Global Structural Information [C] // Acm Sigkdd International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. ACM, 2015: 891-900.
- [32] WANG D, PENG C, ZHU W. Structural Deep Network Embedding [C] // Acm Sigkdd International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. ACM, 2016: 1225-1234.
- [33] DHARAVATH R, ARORA N S. Spark' s GraphX-based link prediction for social communication using triangle counting [J]. Social Network Analysis and Mining, 2019, 9 (1): 1-12.
- [34] AGHABOZORGI F, KHAYYAMBASHI M R. A new similarity measure for link prediction based on local structures in social networks [J]. PHYSICA A, 2018, 501: 12-23.
- [35] FRIEDMAN M. A Comparison of Alternative Tests of Significance for the Problem of m Rankings [J]. Annals of Mathematical Statistics, 1940, 11 (1): 86-92.