

“沧龙号”智能水下机器人

李业政；陈弘宇；袁化鹏

第一部分 设计概述

1.1 设计目的

随着海洋开发的重要性日益上升和科技的进步，水下机器人技术也得到了快速发展，并在军事、商业的部分领域起到了不可替代的作用。针对国内外 UUV 潜水器在水下情报侦察目标识别与反水雷自主攻击、民-水下勘察、科考等任务场合对自主控制与智能化技术和自主探测与识别技术发展的迫切需求，本团队自主设计了一款具有标准化、模块化机体设计，实现北斗导航定位，能自主巡航和自主目标跟踪的“查打一体”便携式水下机器人。

1.2 应用领域

在军事应用方面，“沧龙号”可用于扫雷、反潜、侦查与监视等领域，以执行水下情报侦察、目标识别跟随与反水雷自主攻击、水下光缆巡检等任务。

在商业应用方面，“沧龙号”可用于海上事故救援、打捞，在无法确保潜水员安全的情况下，可利用沧龙号的水下侦察能力，替代潜水员下水作业，以执行水下船体检测、管道巡检、渔场养殖水下监管等任务。

1.3 主要技术特点

(1) 考虑机器人在水下航行时的阻力大小，要求其能够保证稳定的姿态，通过平衡重力与浮力使水下机器人实现零浮力状态进行总体设计。总体结构采用流线型外壳，两侧分别布置垂直推进器以及水平推进器。

(2) 采用北斗导航模块，实现 10 秒定位，2.5m 定位精度，克服对 GPS 的依赖；直接调用百度地图库 API，利用百度地图丰富地理信息，通过 API 接口的调用。

(3) 前端布置有两个图像识别摄像头进行图像采集，内部采用 STM32H7 和 STM32F6 作为图像处理器和主控板，对采集的图像进行处理以及驱动电机旋转，能够以 5 次/秒获取距离或角度偏差量，采用质心检测和线性回归算法，结合搭载的深度、姿态传感器，利用闭环控制算法实现了在水下复杂环境中保持稳定和自主航行的能力。

1.4 关键性能指标

预期通过在外形和控制算法上的研究改进，实现精准水下遥控、自主巡航和原路返航功能。性能指标如下：

- ①5 自由度控制；
- ②航速不小于 2km/s；
- ③续航时间不小于 40min；
- ④自主巡航模式下位置 1000 米航程误差在 2 米以内，远长时间航行误差在 10 米以内；
- ⑤自主返航与出发点误差在 10 米以内；

⑥北斗定位时间 10s（初次定位 30s），定位精度小于 2.5m

表 1 各传感器技术指标

JY901	姿态角	测量范围	俯仰/横滚 $\pm 90^{\circ}$ / $\pm 180^{\circ}$
		静态精度	0.5°
		动态精度	1.0°
	航向角	测量范围	$\pm 180^{\circ}$
		精度	2.0°
	陀螺仪	测量范围	$\pm 500^{\circ}$ /s
		零偏稳定性	25° /h
		非线性	0.2%FS
	加速度计	测量范围	$\pm 6g$
		零偏稳定性	5mg
		非线性	0.03%FS
ATGM336H	北斗	位置精度	2.5m
		速度精度	0.05m/s
MS5837	深度传感器	分辨率	2mm

1.5 主要创新点

（1）北斗导航实时定位技术。采用 ATGM336H 北斗模块,通过水上浮标实时接收经纬度信息，将获取的位置信息解析发送至上位机，并调用百度地图 API,将 WGS84 坐标（标准的地理坐标）转换成 BD09 坐标,并在地图上实时记录。采用简易导航算法，根据目标点与实际位置的经纬度比较，确定目标点的象限，根据根据经纬度差值计算航向偏差，与 JY901 姿态传感器获取的当前航向角进行比较，确定行驶方向。由于实时比较经纬度差值，确保了导航精确度。其示意图如图 1 所示。

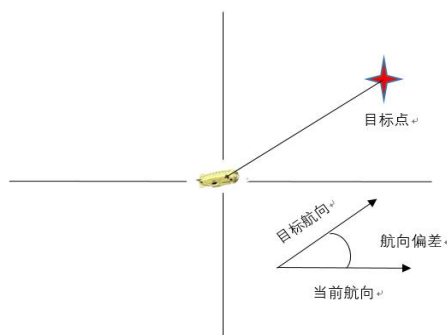


图 1.1 导航定位示意图

(2) 多传感器融合稳姿技术。不同于空气，水下环境复杂，对机器人的正常航行影响因素较多，姿态变化具有随机性和时变性，对其正常的操作存在一定影响。为了解决这一问题，本水下机器人搭载温度、姿态、深度传感器，利用闭环控制算法，实时测量机器人的姿态，根据误差动态调整电机转动使得机器人能够在水下复杂环境中保持平稳运动姿态；

(3) 闭环控制+图像识别的复合控制算法。针对水下机器人的控制难点，提出了闭环控制+图像识别的复合控制算法，即在利用线性回归、阈值检测、图像分割和二值化对采集图像进行处理的基础上，加入闭环控制算法，使得水下机器人能够进行自主航行，实现目标识别与跟踪以及自主巡线功能；

(4) 模块化、集成化的整机设计，使它具备易于操控和维修的特点。本产品内部仅有主控板、电源板、摄像头以及数传模块，具有高集成度化，所有插头皆为插拔式端子，零件采用标准器件，使得机器人在出现故障时能够及时进行更换零件及维修，并且易于拆装、便于操作。

(5) 航行器头部的两个斜向上 45° 的电机，通过调整电机，可以任意输出横向及垂直方向的动力。在推进器推力一定的情况下，可以提供 1.414 倍的垂直方向的推力或横向推力。较两个垂直朝向与横向朝向的电机组而言，该方法更加全面，可以大大增加下潜深度及运动的多变性，可以实现俯仰、横滚、偏航等姿态调整。根据机器人的姿态和运动的物理模型搭建数学模型，然后将其数学模型作为控制对象进行自适应控制算法的编写，自适应控制具有自行组织的特性，使得反应更快超调量更小。

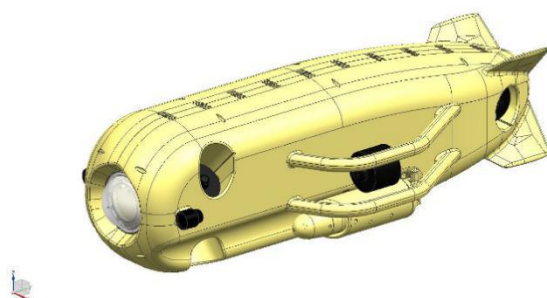


图 1.2 “苍龙号”机器人整体结构图

(6) 鱼雷攻击能力。苍龙号腹部装有两枚鱼雷，当发现敌情时，可以在上位机触发鱼雷。通过装备主动攻击武器，对不明水下机器人进行反击，同时进行自我防御，确保机器人时刻保持战斗力。鱼雷在进行攻击防御的同时，可以对海下不明物标进行直接摧毁。

(7) 原路返航。海洋是个复杂的领域，在海中航行时，各种情况会使得线缆中断，通信出现故障，即水下机器人与上位机失去通信，上位机将无法对机器人平台进行控制。如若航行器在 8S 内不能进行有效接收数据，开始自动返航。下位机可以根据在航行过程中存在 ARM 片内 flash 中航行参数（坐标位置及深度）进行原路返回运动。按照来时路径作为回路可以确保航道的可行性，能够在复杂地形下从容退出，也能够避免水下障碍物的阻挡从而回到起始位置，避免水下机器人在通信失联后的丢失。

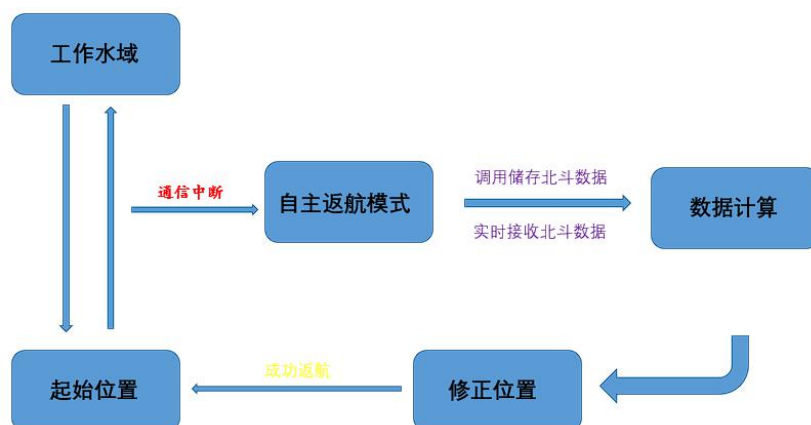


图 1.3 自主返航工作模式流程图

（8）平台搭载。水下机器人采用大腔体结构、排水量大，即在盛载更大容量提升续航能力的同时，也可以搭载多种平台实现多种功能。例如，可以搭载机械臂、探测仪器等，在作业环境恶劣的情况下代替人工在深海进行作业、捕捞、探测等任务。

(9) 多功能上位机。上位机采用 c# 语言编写, 通过调用了 Windows API、百度地图 API 结合下位机相关数据, 将设备姿态、运行状态信息实时显示在电脑屏幕上, 及时掌握设备动态, 确保设备的可靠性。

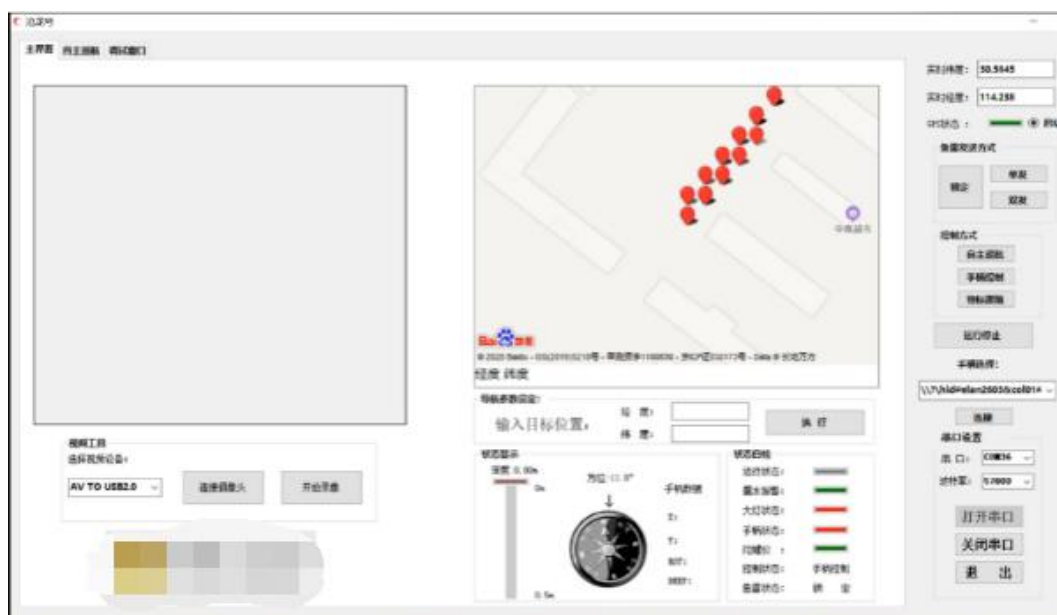


图 1.4 “苍龙号”操作显示界面

第二部分 系统组成及功能说明

2.1 整体介绍



图 2.1 机器人系统整体框图

航行器主要由控制模块，传感器模块，动力模块，攻击模块，通讯模块、视觉模块和北斗模块组成。如图 2.1 所示。

其工作方式分为手柄控制、自主巡航、物标跟随三种。航行器执行近距离探查任务时，通过摇杆进行人工操纵，灵活探测水下区域。执行近海巡防任务时，可通过北斗模块按照设定轨迹进行长时间自主航行。在航行过程中，若发现水下目标，可选用航行器物标跟随模式，锁定跟踪目标，择机对其进行打击摧毁。

2.2 各模块介绍

根据总体系统框图 2.1，给出各模块的具体设计说明。

控制模块：STM32F767 微控制器；

传感器模块：JY901 陀螺仪，MS5837 压力传感器，有线水浸探测器；

动力模块：5 个 350W D80 无刷电机，电调驱动器；

通讯模块：SX1278 无线模块，5.8G 图传发射器接收器，

攻击模块：电缆剪，鱼雷

导航模块：ATGM336H 北斗模块

物标识别模块：OPEN MV 视觉模块

第三部分 完成情况及性能参数

- (1) 可实现手柄的下潜上浮，左右平移等 5 自由度的控制；
- (2) 可实现通信受干扰、中断 8s 后的自动返航功能；
- (3) 目标识别追随可实现，但灵敏度欠佳；
- (4) 通过调用百度地图 API 可实现实时定位、轨迹记录、北斗导航；
- (5) 可实现鱼雷攻击能力，攻击能力超过 50 米以上；
- (6) 北斗定位时间可以达到小于 10s，精确度小于 2.5m；

第四部分 总结

通过团队前期的工作任务分工和实施，最终作品完成的实物如图 4.1 所示。实现了预期的功能。

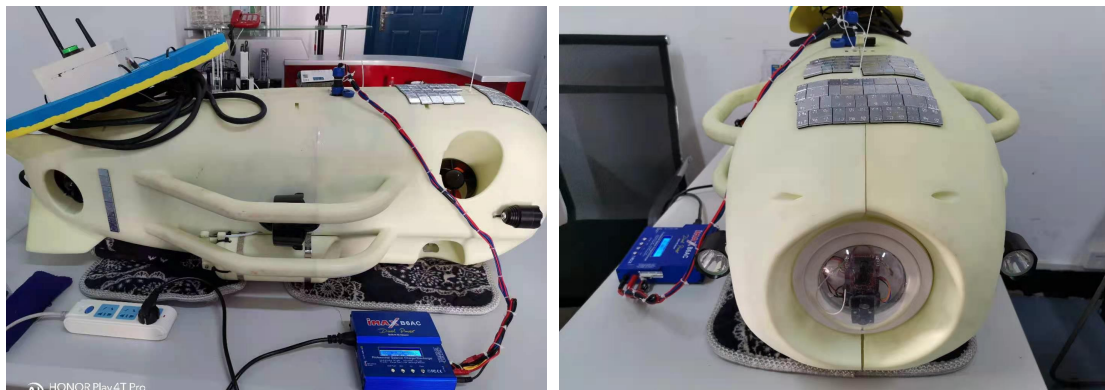


图 4.1 “沧龙号”智能水下机器人实物侧视图和正视图

4.1 可扩展之处

(1) 需要在线调用百度地图，在无网络情况下，导航功能无法使用。后期可制作离线地图包，并结合百度地图 DEMO 相关算法实现离线操作。

(2) 浮标过于庞大，容易暴露目标，可以在水下通信方面进行探索，取消浮标实现真正的无线通信。

(3) 战斗部平台拓展功能不多，需要对武器进行设计才能搭载。

4.2 心得体会

“沧龙号”的设计研发分为了：作品构想，程序、硬件准备和调试组装三个阶段。

(1) 作品构想阶段，充分利用周边资源，请教军事专家，对海洋环境进行深入调研。

(2) 程序、硬件准备阶段，从选定 STM32F767 开发板作为本次比赛的主控板，到深入学习 STM32、C sharp、OPEN MV 程序的编写，让我们对嵌入式、通信、北斗有了一个更加深入地认识。

(3) 调试组装阶段，遇到了很多未知的问题，如：继电器因瞬间大电流烧毁、电调程序故障、线路短路故障、密封舱安装后难以打开等等问题，问题解决阶段，我们在选材、设计上进行了重新优化，做到了可靠稳定。

第五部分 参考文献

[1]李玉洁,张海,苒永娜.余度 IMU 精度分析与数据融合方法改进[J].系统仿真技术,2011,7(04):261-266.

[2]王晓勇,李兴智.某机载电子控制器余度控制技术研究[J].数字通信世界,2019(05):109+214.

[3]Energy; Researchers from Tianjin University Detail Findings in Energy (Online Diagnosis of Inter-turn Short Circuit for Dual-redundancy Permanent Magnet Synchronous Motor Based On Reactive Power Difference)[J]. Energy Weekly News,2019.

[4]刘明,朱守园,王婷.一种双余度交叉通道链路的设计与实现[J].航空计算技术,2019,49(01):106-108+111.

[5]Energy; New Energy Findings from Tianjin University Outlined (Influence of Small Teeth on Vibration for Dual-Redundancy Permanent Magnet Synchronous Motor)[J]. Energy Weekly News,2018.

[6]陈阳,周毅,连红森.一种双余度伺服控制软件模块设计[J].电子技术与软件工程,2018(15):36-38.

[7]Vitali Rachel V,Cain Stephen M,Ojeda Lauro V,Potter Michael V,Zaferiou Antonia M,Davidson Steven P,Coyne Megan E,Hancock Clifford L,Mendoza Alyssa,Stirling Leia A,Perkins Noel C. Body-worn IMU array reveals effects of load on performance in an outdoor obstacle course.[J]. PloS one,2019,14(3).

[8]Yang Chan-Yun,Chen Pei-Yu,Wen Te-Jen,Jan Gene Eu. IMU Consensus Exception Detection with Dynamic Time Warping-A Comparative Approach.[J].

Sensors (Basel, Switzerland),2019,19(10).

[9]Ortega-Bastidas Paulina,Aqueveque Pablo,Gómez Britam,Saavedra Francisco,Cano-de-la-Cuerda Roberto. Use of a Single Wireless IMU for the Segmentation and Automatic Analysis of Activities Performed in the 3-m Timed Up & Go Test.[J]. Sensors (Basel, Switzerland),2019,19(7).

第六部分 附录

6.1 上位机代码:

(1) 北斗导航:

```
double lon_t = lon - Convert.ToDouble(textBox6.Text);
double lan_t = lon - Convert.ToDouble(textBox3.Text);
double lon_m = lon_t * 111;
double lan_m = lan_t * 111;
var rot_gps = Math.Atan2(lon_m, lan_m);
if (lon_t > 0 && lan_t > 0)//目标在实际位置之上
{
    if (rot_gps > angle)
    {
        send_yao[4] = 120;
    }
    else if (rot_gps < angle)
    {
        send_yao[4] = 134;
    }
    else
        send_yao[3] = 150;
}
else if (lon_t > 0 && lan_t < 0)
```

```

        {
            if (rot_gps > angle)
            {
                send_yao[4] = 134;
            }
            else if (rot_gps < angle)
            {
                send_yao[4] = 134;
            }
            else
                send_yao[3] = 150;
        }
    else if (lon_t < 0 && lan_t > 0)
    {
        if (rot_gps > angle)
        {
            send_yao[4] = 120;
        }
        else if (rot_gps < angle)
        {
            send_yao[4] = 134;
        }
        else
            send_yao[3] = 150;
    }
else
{
    if (rot_gps > angle - 360)
    {
        send_yao[4] = 120;
    }
    else if (rot_gps < angle)
    {
        send_yao[4] = 134;
    }
    else
        send_yao[3] = 150;
}

```

(2) 调用百度地图

<html>


```

    <head>
    <meta http-equiv="Content-Type" content="text/html;
charset=utf-8" />
    <meta name="viewport" content="initial-scale=1.0,
user-scalable=no" />
    <style type="text/css">
        body, html, #allmap {width: 100%;height: 100%;overflow:
hidden;margin:0;font-family:"微软雅黑";}
    </style>
    <script type="text/javascript"
src="http://api.map.baidu.com/api?v=2.0&ak=UIK1XiRUPaoaSxXmKqrcZMrf">
</script>
    <title>单击获取点击的经纬度</title>
</head>
<body>
    <div id="allmap" style="width: 550px;height: 360px;"></div>
    <div>
        <label>经度</label>
        <span id="jing_du"></span>
        <label>纬度</label>
        <span id="wei_du"></span>
    </div>
</body>

<script type="text/javascript">
    // 百度地图 API 功能
    var map = new BMap.Map("allmap");
    var point = new BMap.Point(116.403963, 39.915119);    // 创建点坐标
    (经度, 纬度)
    var marker = new BMap.Marker(point);    // 创建标注
    map.addOverlay(marker);    // 将标注添加到地图中
    marker.setAnimation(BMAP_ANIMATION_BOUNCE);    //跳动的动画
    //单击获取点击的经纬度
    map.addEventListener("click", function(e) {
        var jing_du_value = e.point.lng ;
        var wei_du_value = e.point.lat;
        var jing_du = document.getElementById("jing_du");
        var wei_du = document.getElementById("wei_du");
        jing_du.innerHTML= jing_du_value;
        wei_du.innerHTML= wei_du_value;
    });
    // 百度地图 API 功能
    map.centerAndZoom(point, 8);
    setTimeout(function() {

```

```

        map.setZoom(14);
    }, 2000); //2 秒后放大到 14 级
    map.enableScrollWheelZoom(true);
    var marker2;
    function setLocation(x,y){//参数: 经纬度
        var point = new BMap.Point(x, y);
        //坐标转换完之后的回调函数
        translateCallback = function (data){
            if(data.status === 0) {
                var marker = new BMap.Marker(data.points[0]);
                map.addOverlay(marker);
                map.setCenter(data.points[0]);
            }
        }

        setTimeout(function() {
            var convertor = new BMap.Convertor();
            var pointArr = [];
            pointArr.push(point);
            convertor.translate(pointArr, 1, 5, translateCallback)
        }, 1000);
    }
</script>

</html>

```

6.2 下位机代码:

```

void f2pwm(void)
{

```

```

    pwm.pwm[0]=f.fy*K_PWM*1.7;
    if(f.fx>=0)
        pwm.pwm[1]=(f.fx*K_PWM/3-f.frot*1.5*K_PWM);//3.6
    else
        pwm.pwm[1]=(f.fx*K_PWM/3-f.frot*1.5*K_PWM);//4.3
    pwm.pwm[1]=pwm.pwm[1]*1.1;
    pwm.pwm[2]=-f.fy*K_PWM*1.7;
    pwm.pwm[3]=((0.7071*f.fz+0.3536*f.fx)*K_PWM/2.0 +
f.frot*1.5*K_PWM/2);
    pwm.pwm[4]=((0.7071*f.fz-0.3536*f.fx)*K_PWM/2.0 -
f.frot*1.5*K_PWM/2);
    pwm.pwm[5]=1000;
    if(ctrlsignal.servo==0xaa)//0ÃÀ×ÊµÑé³É¹|Êý¼Ý

```

```

        pwm. pwm[5]=750;
    else
        pwm. pwm[5]=1000;
    if(ctrlsignal. led==0x00)
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, GPIO_PIN_14, GPIO_PIN_RESET);
    else if(ctrlsignal. led==0xAA)
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, GPIO_PIN_14, GPIO_PIN_SET);
}

```

(1) 百度地图

```

var map = new BMap.Map("allmap");
var point = new BMap.Point(116.403963, 39.915119);    // 创建点坐标(经
度, 纬度)
var marker = new BMap.Marker(point);    // 创建标注
map.addOverlay(marker);    // 将标注添加到地图中
marker.setAnimation(BMAP_ANIMATION_BOUNCE); //跳动的动画
//单击获取点击的经纬度
    map.addEventListener("click", function(e) {
        var jing_du_value = e.point.lng ;
        var wei_du_value = e.point.lat;
        var jing_du = document.getElementById("jing_du");
        var wei_du = document.getElementById("wei_du");
        jing_du.innerHTML= jing_du_value;
        wei_du.innerHTML= wei_du_value;
    });
// 百度地图 API 功能
    map.centerAndZoom(point, 8);
    setTimeout(function() {
        map.setZoom(14);
    }, 2000);    //2 秒后放大到 14 级
    map.enableScrollWheelZoom(true);
var marker2;
    function setLocation(x, y) { //参数: 经纬度
        var point = new BMap.Point(x, y);
//坐标转换完之后的回调函数
        translateCallback = function (data) {
            if(data.status === 0) {
                var marker = new BMap.Marker(data.points[0]);
                map.addOverlay(marker);
                map.setCenter(data.points[0]);
            }
        }
    }

    setTimeout(function() {

```

```

        var convertor = new BMap.Convertor();
        var pointArr = [];
        pointArr.push(point);
        convertor.translate(pointArr, 1, 5, translateCallback)
    }, 1000);
}

(2)Openmv
uart = UART(1, 115200)
while(True):
    #i=i+1
    output_str="%x%x\n" % (0,0)
    uart.write(output_str)
    clock.tick()
    img = sensor.snapshot()
    for obj in net.search(img, threshold=0.6, min_scale=0.4,
scale_mul=0.8, \
        x_overlap=-1, y_overlap=-1, contrast_threshold=0.5):
        print("Detected %s - Confidence %f%%" % (labels[obj.index()],
obj.value()))
        output_str="%x%x\n" % (0,0)
        uart.write(output_str)
        if labels[obj.index()]=="ship":
            blobs = img.find_blobs([red_threshold])
            max_blob = find_max(blobs)
            pan_error = max_blob.cx()-img.width()/2
            tilt_error = max_blob.cy()-img.height()/2
            img.draw_rectangle(max_blob.rect())
            img.draw_cross(max_blob.cx(), max_blob.cy())
            pan_output=pan_pid.get_pid(pan_error,1)/2
            tilt_output=tilt_pid.get_pid(tilt_error,1)
            if pan_output>0:direction=3
            if pan_output<0:direction=4
            output_str="%x%x\n" % (0,direction)
            if i==1:uart.write(output_str)
            if tilt_output>0:direction=2
            if tilt_output<0:direction=1
            output_str="%x%x\n" % (0,direction)
            if i==2:uart.write(output_str)
            h_error = max_blob[2]*max_blob[3]-size_threshold
            if h_error>0:direction=5
            if h_error<0:direction=6
            output_str="%x%x\n" % (0,direction)
            if i==3:uart.write(output_str)

```

#if i>3:i=1