

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.10.013

# 一种水下机器人的水面平台控制系统设计\*

蔡艺超,周 军\*

(河海大学 机电工程学院,江苏 常州 213022)

**摘要:**针对水下机器人进行水下检测时的实时控制和监控问题,对水下机器人的推进器结构、运动方式、通讯方式、机体状态显示方式、运动控制方法等方面进行了研究,对水下机器人实现高效水下检测所需的各功能需求进行了归纳,提出了一种基于 LabVIEW 的 ROV 水下机器人的水面平台控制系统,利用实验水池对水下机器人的人机交互界面和摄像头拍摄图像进行了测试。研究表明,该系统能实时监测水下机器人的各项性能数据,能够实现通讯连接、机体状态显示、运动控制等多项功能,实时控制响应迅速,实时监控效果好。

**关键词:**水下机器人;LabVIEW;控制系统;人机交互界面

**中图分类号:**TP242;TH39

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2016)10-1221-06

## Control system design of underwater robot on overwater platform

CAI Yi-chao, ZHOU Jun

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China)

**Abstract:** Aiming at real time controlled and monitored of the underwater robot for underwater detection, the propeller layout, exercise mode, communication mode, robot status display mode, motion control method, etc. of the underwater robot were studied. All the functional requirements needed of the underwater robot to realize the efficient underwater detection were summarized, to propose a control system of ROV on overwater platform based on LabVIEW. Human-computer interaction interface and camera images of the underwater robot were tested by using experimental tank. The results indicate that the system can real-time monitor all kinds of performance data of the underwater robot and can realize communication connection, robot status display, motion control and etc. functions. Real-time response is quick while real-time monitoring effect is good.

**Key words:** control system; underwater robot; LabVIEW; human-computer interactive interface

## 0 引言

现今,带缆遥控水下机器人已渐渐成为了水下构筑物(如水坝、涵道、桥墩、港口等)安全检测的重要手段,其通常由脐带缆、水下机器人和机器人轨迹与姿态控制机构组成<sup>[1-3]</sup>。然而,当前国内的大多数小型勘测级水下机器人在实际应用中普遍存在以下问题:受制于动力执行单元的数量与布局,机器人运动形式单一、

完成某些特定高难度任务时缺乏运动灵活性;操作人员仅通过摄像头来观察水下环境,对机器人的当前工作状态信息了解不足,检测效果也欠佳。在该领域,国内外研究学者进行了许多的研究实验,并提出了许多控制系统设计方法,如:葛新等<sup>[4]</sup>提出了基于虚拟现实的 ROV 辅助控制系统设计的方法;高玉霞<sup>[5]</sup>提出了基于虚拟仪器的惯性导航设备测试平台设计与实现的方法;甘永<sup>[6]</sup>提出了水下机器人控制系统体系结构的研究的方法等。

收稿日期:2016-05-30

基金项目:江苏省科技支撑计划资助项目(BE2012096)

作者简介:蔡艺超(1992-),男,江苏张家港人,硕士研究生,主要从事机械装备的智能控制技术及工业机器人方面的研究. E-mail:278679338@qq.com

通信联系人:周 军,男,教授,硕士生导师. E-mail:zhj6171@163.com

本研究提出一种八推进器小型勘测级 ROV 水下机器人,其拥有 6 个自由度,运动灵活性好,能够进行全方位的旋转和平移运动,且该机构具有一定的故障冗余能力,鲁棒性好。此外,还为水下机器人加装了 2 个摄像头、4 个万向轮,使其能够以特有的侧翻贴壁方式对水下构筑物表面进行检测,改善了检测效果。水面平台控制系统是水下机器人的指挥中心和人机交互平台,有助于操作人员对水下机器人进行实时状态监控,将操作者的控制意图解释并执行。

综合考虑工程应用实际需求,本研究构建水面平台控制系统的总体结构,并将所有任务按照功能划分为子模块并进行具体实现。

## 1 总体结构设计

为了能够快速开发,本研究的开发环境以 Lab-

VIEW 为主框体,以 VC++ 为补充的形式搭建。LabVIEW 自带功能模块可节省开发时间,在界面设计上具有得天独厚的优势,其丰富多样的功能控件,都有助于缩短开发时间,同时效果上并不逊色其它开发环境<sup>[7]</sup>。然而,LabVIEW 图形化编程的特点针对一些复杂运算、大型代码却有失灵活性,实现与维护工作量大。针对这些运算码段采用 C++ 代码实现,然后封装为 DLL 动态库,交由 LabVIEW 调用,有效弥补了 LabVIEW 这一缺陷。

通过对系统需求进行分析,采用功能模块化设计理念,本研究将水面平台控制系统大致分为 4 个模块,分别为通信模块、机体状态显示模块、运动控制模块和其他功能模块。整个框架功能清晰明了,各模块设计任务细化明确,便于系统功能模块化编写调试。总体结构图如图 1 所示。

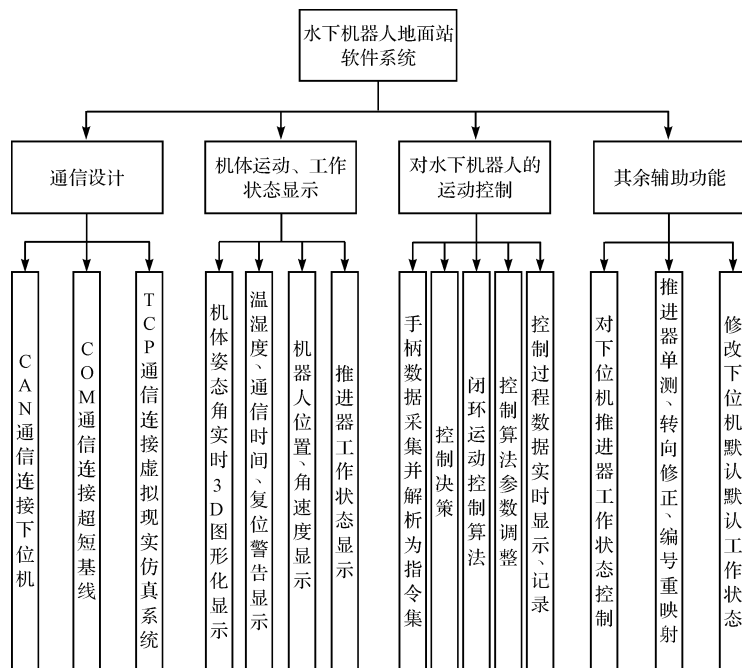


图 1 水下机器人水面平台控制系统的总体结构图

虽然图 1 将程序细分为独立的 15 个事务,然而某些事务间存在相互协调、数据共享、前后约束等关系,在实际编程中应当重视事务间逻辑关系设计。此外,还需考虑事务的功能响应特性而采用不同处理方式,需要频繁更新处理的事务采用循环结构不断扫描获取最新数据并做处理,如操纵手柄数据采集、COM 数据接收处理、CAN 数据接收处理、控制算法循环迭代更新;而那些按需产生的间歇性事务则采用事件结构触发,如修改水面平台默认工作状态、控制推进器工作状态等。综合考虑事务的响应特性及事务间的关系,水面平台控制系统的运行框架,共分为相对独立的 7 个

并行 While 循环,分别为手柄数据采集循环、运动控制循环、COM 通信循环、TCP 通信循环、机体 3D 姿态显示循环、CAN 数据接收处理循环、其余事件触发循环。

## 2 用户界面设计

根据前面介绍的功能需求及总体结构,本研究以操作习惯、用户体验为导向,按照功能以选项卡模式分列为 10 个子界面,包括 1 个主界面及 9 个辅界面。页面上不同控件都按照功能近似原则聚集分版放置,使得整体外观清晰明了。

ROV\_CON 为主操作页面,其聚集了水面平台控

制系统的大部分重要交互功能,在实际操作使用中需要主要参照此页面。其主要内容如下:水下机器人运动状态显示,姿态角 3D 原型仿真显示,以及 3 轴角速度与水深值数字化显示;与机载控制系统建立主通信的控件组,可打开、连接 CAN 设备;显示机载控制系统工作状态,包括连接通信时间、温湿度、推进器供电状态等;机体动力执行单元开关控制,可设置步进电机启停、换向,亦可控制推进器开断动力电及运行使能;操纵手柄生成的指令集图形化显示,通过一些信号灯、表盘、滑动杆及进度条来描述用户当前给定的动作具体信息;最后,在主页面还居中设置了一个停止按钮,点击该按钮可以使机载控制器软件关闭连接资源、停止运行,同时也会发送指令至机载控制器使其停止动作。

主操作页面的具体内容布局如图 2 所示。

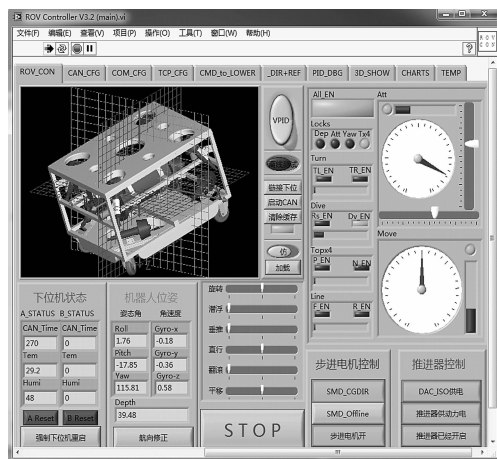


图 2 水下机器人水面站控制主界面

除了 ROV\_CON 外其余的选型卡页均为辅助设计页,按照功能分类,每个子页都囊括了该功能涉及的所有相关数据。CAN\_CFG 页包括了 CAN 通信的所有内容,可进行掩码、波特率、工作模式等通信配置,亦可观察 CAN 通信原始数据。COM\_CFG 页包括了串口通信的所有内容,可进行串口号、波特率等通信配置,亦可观测 COM 通信源数据辅助协议调整。TCP\_CFG 页包括了 TCP 通信的所有内容,可进行通信端口号等设置,亦可观测所有的通信源数据并手动调试。CMD\_to\_LOWER 页用作向机载控制器发送指令,修改机载控制器的默认工作状态,如 CAN/USART 波特率、姿态传感器工作模式修改等。\_DIR\_REF 页用作对推进器进行信号链路单测,并修改推进器转向及推进器编号重映射。PID\_DBG 页在运动控制算法调试中用到,可对控制参数就行测试以寻求最优。3D\_SHOW 页是针对机体姿态 3D 显示场景进行设置,如视角、视图边界大小、背景色等。CHARTS 页可观察记录控制过程中的

一些重要目标数据、中间数据等过程响应,可据此分析控制过程的优劣。TEMP 页则是用来保存一些不重要的控件,调试新功能时可作为临时测试页面。

### 3 若干关键技术实现

根据前面的总体结构分析可知,水面站软件系统按照功能共划分为 4 个模块,又细分为 15 个子事务。本研究将选取其中比较重要的几个事务,详解其具体技术要领实现过程。

#### 3.1 CAN 总线通信实现

本研究设计使用 CAN 总线与机载控制系统通信,由于 PC 本身并不带 CAN 总线接口,这里采用外接第三方 USB-CAN 设备的形式实现。本研究选用的 iTEK 的 USB-CAN 设备,其通道集成电气隔离保护电路,并且符合 CAN2.0A/B 规范,支持 5 Kbps ~ 1 Mbps 之间的任意波特率。此设备供二次开发的库函数以动态链接库的形式提供给 LabVIEW 调用,通信工作流程如图 3 所示。

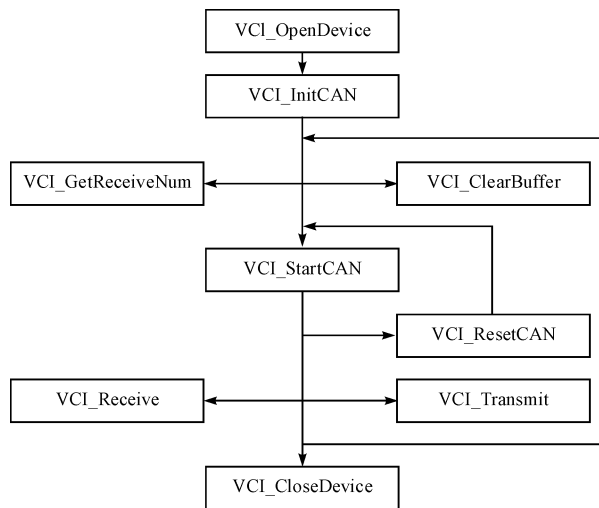


图 3 CAN 总线通信工作流程

该工作流程主要库函数释义如下<sup>[8-9]</sup>:

VCI\_OpenDevice/VCI\_CloseDevice:该函数用以打开/关闭设备;

VCI\_InitCAN:该函数用以初始化指定的 CAN 设备;

VCI\_StartCAN:该函数用以启用 CAN 设备;

VCI\_ClearBuffer:该函数用以清除指定缓冲区的数据缓存;

VCI\_GetReceiveNum:获取指定接收缓冲区中已接收但还未被读出的报文帧数;

VCI\_ResetCAN:该函数用以复位 CAN;

VCI\_Receive:该函数用以从指定的设备读取数据;

VCI\_Transmit;该函数用以从指定的设备发送数据;该系统 CAN 通信统一使用标准帧,其标识符(ID)为 11 bits,数据包为 8 字节。由于整个系统只有两个 CAN 控制节点,则不用设置掩码,对所有报文都全部接收。鉴于 CAN 报文形势为 ID + Data[8],可直接将 ID 作为功能码,Data[8]作为操作数,相对串口通信等可大大缩减协议的编写与解析的开销。如此便完成了水面站软件系统与机载控制系统的通信数据交互。根据功能需求,水面站需要从机载控制器获取的主要报文数据如表 1 所示。

表 1 水面平台接收的 CAN 报文库举

ID	信息内容描述
0x088	机载控制系统默认工作状态修改成功响应码
0x55A	通信时间、温湿度;推进器工作状态反馈
0x444	机载控制器发生看门狗复位
0x333	机体三轴姿态角及水深值
0x777	机体三轴角速度

### 3.2 手柄数据采集及指令集生成

由于水下环境复杂、工作难度高、不确定因素大,本研究设计的水下机器人运动主要为用户通过操纵手柄遥控操作,使得运动更加灵活、可靠、智能。本研究选用的操纵手柄为市面上通用的 Xbox 游戏手柄,可缩减开发时间,同时拥有更多设计参考样本。Xbox 手柄及其输出数据簇如图 4 所示。



图 4 Xbox 手柄及其输出数据簇

其设有两个摇杆两个油门共 5 轴数据输出、一个方向钮及共计 10 个按钮,在外形设计上也很讲究可操作性。由于 Xbox 手柄为免驱 USB\_HID 设备,LabVIEW 只需要调用自带的 3 个库函数“Initialize Joystick”、“Acquire Input Data”及“Close Input Device”便可以实现数据采集。笔者将“Acquire Input Data”函数放入独立的 While 循环,设置延时 40 ms,以 25 Hz 的频率不断地采集数据。

在实际控制需求中,某些复杂动作通常不能用手柄单个控件来描述,而是需要几个控件联合配合完成。根据手柄特征,本研究对手柄上的所有控件一共规划 18 种组合,控制手柄有效控件组合含义如

表 2 所示。

表 2 控制手柄有效控件组合含义

手柄控件组合	功能描述
7 号键/BACK	退出闭环运算,进入开环控制
8 号键/START	进入闭环运算
9 号键/XY 摇杆下按	控制“推进器速度更新”控件的触发
10 号键/XY 旋转轴摇杆下按	控制“推进器动力供电”控件的触发
3 号键/X	TopX4 垂推电机速度锁定或解锁
1 号键/A	YAW 角期望航向值锁定或者解锁
2 号键/B	Dep 期望水深值锁定或者解锁
4 号键/Y	Att 姿态角锁定或者解锁
XY 旋转轴摇杆( + LB)	在闭环中,输出 ROLL 和 PITCH 的期望输出值,按键倍增
XY 轴摇杆( + RB)	任意角的平动指令,推杆指向为移动方向,按键倍增
左方向键 + RT( + LB)	左转指令,按键为提档增倍
右方向键 + RT( + LB)	右转指令,按键为提档增倍
上方向键 + RT( + LB)	上浮指令,按键为提档增倍
下方向键 + RT( + LB)	下潜指令,按键为提档增倍
上方向键 + LT( + RB)	四只垂推反转,按键为提档增倍
下方向键 + LT( + RB)	四只垂推正转,按键为提档增倍
左方向键 + LT( + RB)	直线后退指令,按键为提档增倍
右方向键 + LT( + RB)	直线前进指令,按键为提档增倍

共计 6 种动作指令设计,分别为旋转、潜伏、垂推、直行、翻滚及平移。指令集的形象表述如图 2 主界面中的右上部分:Turn、Dive、Topx4、Line、Att 及 Move 分别表示 6 种动作指令,其中指示灯描述当前指令是否被激活,进度条表示油门量,表盘指示方向,滑动条描述偏角刻度;All\_EN 灯点亮表示进入闭环运动控制,否则为直接开环给定输出;Locks 中 Dep、Att、Yaw 及 Topx4 灯指示中对水深、姿态、偏航及垂推给定量进行锁定,即在点亮灯时则锁定当前的动作给定量,之后即使油门、摇杆回位也能继续保持状态直到灭灯。此外,本研究在界面额外增加一组滑动杆对各个动作进行分档,从而限制了手柄油门给定的最高速度;同时手柄也设置了提档增倍功能,当按下 LB 或 RB 时压死油门可达到当前指令的分档后的最高速度,否则减半。由于该部分编程相对复杂,本研究将以上描述功能用 C++ 语言实现并封装为 DLL 库,以接口函数的形式由 LabVIEW 一次调用完成手柄数据至指令集转换。

### 3.3 控制决策过程设计

控制决策主要解决的是如何让各推进器按照某一规律配合转动完成指令集所描述的动作的问题。想要实现正确的速度解算,必须参考其动力学模型,在此本研究首先对机体各个位置推进器进行命名并指定预设编号,各个推进器的预设编号如图 5 所示。

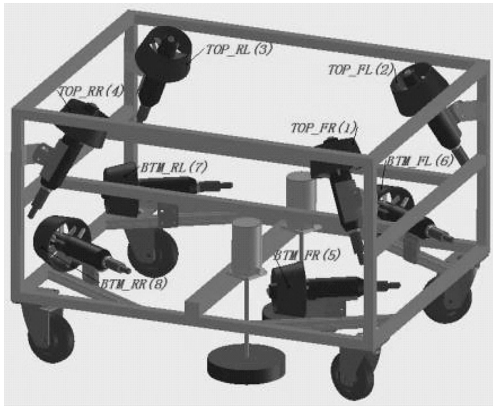


图 5 各个推进器的预设编号

由 3.2 小节可知,指令集共包含了 6 种动作,在机体小角度倾斜的情况下可以这样的初步分工: Turn、Line 及 Move, 3 个动作由 5 - 8 号推进器完成; Dive、Topx4 及 Att, 3 个动作由 1 - 4 号推进器完成。具体地,根据动作指令的油门量来控制动作力道、幅度,根据动作指令的方位角来指定方向。为了达到更精准地控制,各个推进器的推力分配还需参照模型进行平面分解或者空间分解。因此,参照动作特性、动力模型为各指令分配不同的推进器组作为执行单元,最终简化了控制决策方案。

本研究设计的控制决策过程根据指令激活与否做不同的处理,激活则给定输出执行动作,否则维持当前状态;根据实际需要,对 Dive、Turn 及 Att, 3 条指令插入闭环控制,用以实现定深控制和定姿控制。

### 3.4 控制算法参数在线调试

本研究采用 PID 算法对水深、横滚角、俯仰角和偏航角 4 个量进行闭环控制,其 3 个参数 P、I、D 的值通常采用现场在线调试的方法进行修改,从而获得最优参数效果。在 PID\_DBG 页中,设置有各个量的 PID 参数,可以手动对其进行实时调节,同时设有 3D 仿真显示,可通过观察其状态(如超调振荡等)来分析,然后进

行对其进行相应的参数调节,直至获得较好效果为止。控制算法参数在线调试界面如图 6 所示。

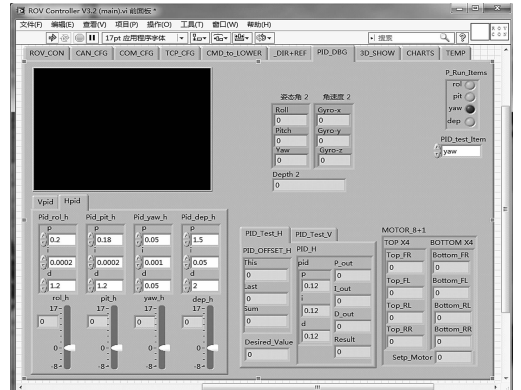


图 6 控制算法参数在线调试界面

### 3.5 机体运动姿态角 3D 仿真显示

在实际工作中,当机体下潜比较深的时候,在岸上是无法看清其运动状态的。因此,有必要在水面平台界面上形象地显示水下机器人当前的运动状态,而 3D 图形显示则更为直观。首先,添加机器人模型、坐标系模型、三维场景等场景对象,并保持对象间的父子关系;然后,设置场景属性,如显示位置、缩放倍率、反光色、视角、显示边界等;最后,按照机载控制系统反馈的姿态角数据旋转 3D 机器人模型。模型只需要加载一次,循环最后一个步骤,得到效果就是机器人模型在坐标系背景中的实时变换姿态。值得注意的是:机器人模型与背景坐标系模型均由三维软件建模后导出的,在建模过程中应当保证其原点在中心,否则无法保证加载后二者完美重合;而本研究选用的工作坐标系(右手坐标系)可以参照如图 2 的 3D 图形背景坐标系,但姿态传感器内部却是按照左手坐标系转换输出的,为此只需要将 Roll、Pitch 角度及角速度取反即可完成转换;此外,设置对象旋转的 Set Rotation 函数需要的人参并不是以欧拉角的形式,而是用四元数表达,这样只需绕某一向量一次旋转即可到位,其转换公式<sup>[10]</sup>如下:

$$q = \begin{bmatrix} w \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi/2) \cos(\theta/2) \cos(\psi/2) + \sin(\varphi/2) \sin(\theta/2) \sin(\psi/2) \\ \sin(\varphi/2) \cos(\theta/2) \cos(\psi/2) - \cos(\varphi/2) \sin(\theta/2) \sin(\psi/2) \\ \cos(\varphi/2) \sin(\theta/2) \cos(\psi/2) + \sin(\varphi/2) \cos(\theta/2) \sin(\psi/2) \\ \cos(\varphi/2) \cos(\theta/2) \sin(\psi/2) - \sin(\varphi/2) \sin(\theta/2) \cos(\psi/2) \end{bmatrix}$$

$$\alpha = 2 * \arccos(w) \tag{1}$$

式中: $\varphi, \theta, \psi$ —滚转角(Roll),俯仰角(Pitch),偏航角(Yaw); $(x, y, z)$ —旋转轴向量; $\alpha$ —旋转角。以上角度均为弧度制。

## 4 实验及结果分析

为了验证整套设备的各项功能,本研究进行了整

体系统功能测试。整套设备主要包括水下机器人本体、脐带缆、直流电源箱、超短基线、计算机、操控手柄、CAN 转换器等。操作流程如下:首先,依次连接各组件,随后打开电源箱开关;然后,操作水面站软件界面,建立 CAN 通信,给推进器接通动力电,打开推进器运行使能开关,在开环给定模式下测试推进器是否全部

运行正常,检查各传感器、摄像头是否接收数据正常;最后,将水下机器人本体放入水中,切换至闭环控制模式,操作手柄便可开动机器人。

测试现场图如图 7 所示。

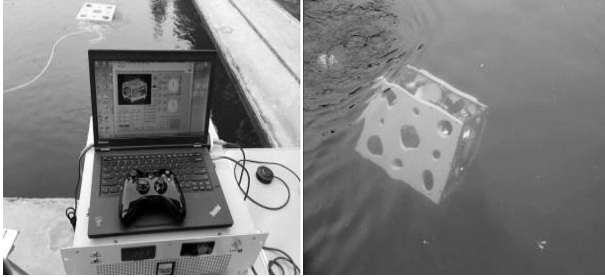


图 7 整套设备在测试现场的测试图

此外,视频采集功能也正常运行,能够实现预览保存视频功能,其前视及俯视摄像头拍摄的图像如图 8 所示。

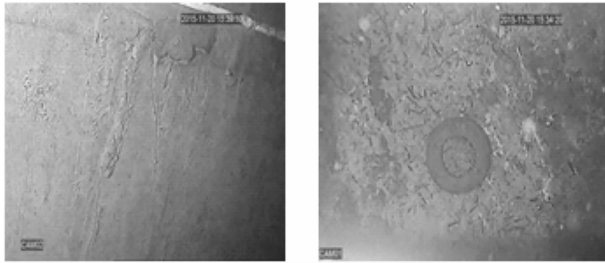


图 8 前视和俯视摄像头拍摄到的图像

通过多次测试表明,本研究研制的八推进器水下机器人运动形式灵活多样,拍摄观察手段丰富,可以满足多种苛刻水环境的勘测要求。

## 5 结束语

本研究完成了水下机器人水面平台控制系统的设计与实现。首先,分析了其功能需求,并提出了控制系统结构设计。紧接着,根据各子模块任务特点及模块间的耦合关系,设计了水面平台控制系统的总体运行框架。然后,对水面平台控制系统的若干关键技术实

现做了详细讲解,比如控制决策过程设计、手柄控件至指令集规划等。最后,将整套设备带到调试现场进行了基本功能测试。

现场调试过程中,机器人能够按照操纵人员的意图实现空间任意平移运动,以及大幅度的姿态翻滚,并对三轴姿态角及水深 3 个运动状态实现了闭环跟踪保持。同时,操纵人员也能从水面平台软件界面上对机器人的各状态(姿态角、水深、温湿度等)进行实时监控,达到了预期的效果。

## 参考文献(References):

- [1] 彭阿静. 一种用于安保的水下机器人设计[J]. 机电工程技术, 2015, 44(6): 59-61.
- [2] 吴家鸣, 崔寅. 控制动作下带缆遥控水下机器人的水动力特性[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2012, 40(4): 18-26.
- [3] DRISCOLL FR, LUECK RG, NAHON M. Development and validation of a lumped-mass dynamics model of a deep-sea, ROV system[J]. *Ocean Research*, 2010, 22(3): 169-182.
- [4] 葛新, 郭威. 基于虚拟现实的 ROV 辅助控制系统设计[J]. 机械设计与制造, 2012(11): 91-93.
- [5] 高玉霞. 基于虚拟仪器的惯性导航设备测试平台设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学自动化学院, 2013.
- [6] 甘永. 水下机器人运动控制系统体系结构的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 2007.
- [7] KRING T J. LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun, Third Edition[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008.
- [8] 徐闯, 邓忠华. 基于 CANopen 的套色系统主站的实现[J]. 轻工机械, 2014, 32(1): 54-57.
- [9] 北京爱泰电子. CAN-BUS 接口函数库使用手册 V1.0 [M]. 北京: 爱泰电子, 2011.
- [10] 秦永元. 惯性导航[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2006.

[编辑: 张 豪]

### 本文引用格式:

蔡艺超, 周军. 一种水下机器人的水面平台控制系统设计[J]. 机电工程, 2016, 33(10): 1221-1226.

CAI Yi-chao, ZHOU Jun. Control system design of underwater robot on overwater platform[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(10): 1221-1226.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>