

基于嵌入式系统 STM32 的 UUV 通用运动控制层设计

朱衍明, 林九根, 宋家平, 王天昊

(中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100094)

摘要: 为提高 UUV 分布式控制系统架构中运动控制层的通用性, 依据分布式计算和模块化设计的原则, 设计了一种基于嵌入式系统 STM32 的通用运动控制层架构; 硬件电路设计以 STM32F407ZGT6 型芯片为核心微控制器, 支持两路 CAN 总线进行层间通信和推进器控制, 输出 4 路 PWM 进行舵机控制, 对外提供多路 RS232 和 RS485 总线接口与各种传感器进行数据交互, 并设计了一片 IIC 接口的掉电非易失 EEPROM 进行参数保存; 软件设计实现 CAN 总线数据通信和 X 舵到十字舵的转换逻辑控制; 经实验测试, 该设计方案能够完成 UUV 的推进器推进功率控制和 X 舵的上下左右转向打舵控制, 实现了与上层决策规划层进行 1 Mbps 速率的 CAN 总线数据通信; 结果表明, 该设计方案达到了运动控制层的设计目标, 实现了具有较强通用性的 UUV 运动控制层设计。

关键词: UUV; STM32F407ZGT6; CAN 总线; X 舵; 运动控制

Universal Design of Motion Control Layer in UUV Based on STM32

ZHU Yanming, LIN Jiugen, SONG Jiaping, WANG Tianhao

(CSSC Systems Engineering Research Institute, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to improve the generality of motion control layer in UUV distributed control system architecture, a general motion control layer architecture based on embedded system STM32 is designed according to the principles of distributed computing and modular design. The hardware circuit design which is based on STM32F407ZGT6 microcontroller chip supports two CAN bus for inter layer communication and thruster control, outputs 4-way PWM to control the steering engine, provides multi channels of RS232 and RS485 bus interface for data exchange with various sensors, and provides a non-volatile EEPROM with IIC interface to save some parameters. The software design realizes CAN bus data communication and conversion logic control from X rudder to cross rudder. The experimental results show that the design can complete the propulsion power control of UUV propeller and X rudder steering operation, and the CAN bus data communication at 1Mbps rate with the upper decision planning layer is realized. The results show that the design scheme achieves the design goal of motion control layer and realizes the universal design of UUV motion control layer.

Keywords: UUV; STM32F407ZGT6; CAN bus; X rudder; motion control

0 引言

海洋面积约占地球总面积的百分之七十一, 并且在广阔的海洋里蕴含着丰富的生物和矿物资源^[1]。随着人类工业化和城市化的进程加剧, 以及全球航海运输的进一步发展, 陆上资源日益枯竭, 世界各国的能源开发正在由陆地转向海洋, 对海洋资源的争夺和开发在 21 世纪将逐渐成为海洋大国的最重要研究方向之一^[2]。

受海洋水下条件以及人类自身条件的约束, 在对海洋的探索和开发过程中, 无论在民用还是军用产品上, 人们通常选择使用无人装备, 即水下机器人。无人水下航行器(UUV, unmanned underwater vehicle)正是这样一种优秀的水下无人装备平台, 其运行方式为半自主式或智能自主式。能够通过自身携带的能源和各种传感器设备, 完成对

任务区域的探测和任务执行并顺利返航^[3]。

近十几年, 随着微电子技术的发展以及人工智能技术的突破, 无人水下航行器得到了长足发展, UUV 的控制系统也随之越来越强大和复杂。传统的集中式计算控制系统架构已经难以满足复杂的任务控制需求, 基于分布式分层理论的控制架构已越来越多地被各科研机构和开发商所采用^[4-6]。本文正是在分层式 UUV 控制系统架构的基础上, 提出了一种基于嵌入式系统 STM32 的 UUV 运动控制层设计方案, 艇体采用 X 型舵加推进器进行运动执行, 能够很好地缓解决策层的运算压力, 提高控制系统的整体可靠性。

1 UUV 的总体设计

UUV 的系统架构会直接影响控制系统的设计和实现难度, 并影响航行器的稳定性、可靠性以及航行器的运动能

收稿日期: 2021-08-02; 修回日期: 2021-08-26。

作者简介: 朱衍明(1988-), 男, 江苏徐州人, 硕士, 工程师, 主要从事航空电子技术方向的研究。

引用格式: 朱衍明, 林九根, 宋家平, 等. 基于嵌入式系统 STM32 的 UUV 通用运动控制层设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(12): 120-125.

力。合理的系统架构能够使 UUV 通过自身的各种传感器获得自身的运动信息和周围环境的相关信息, 能够使 UUV 的决策系统做出合理的决策, 并准确合理地驱动实体层的具体执行机构, 同时还具有一定的与其他系统相兼容的特点, 并且更容易进行系统能力扩展, 例如增添其他传感器设备等。目前业界广泛使用的系统架构如图 1 所示, 其系统结构分为 4 层, 这 4 层既包含了硬件系统架构, 也包含了软件系统架构^[7-9]。

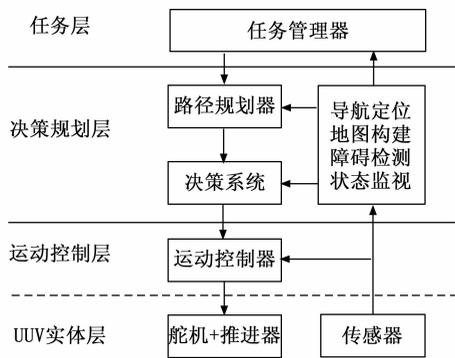


图 1 分层式系统架构

任务层是整个 UUV 控制系统的最高层, 主要负责接收岸基端发来的任务指令, 之后将要执行的复杂任务解析成若干个子任务后传递给下一层, 同时还要负责电池剩余电量的推算等相关系统管理任务。

决策规划层主要涉及到 UUV 各种算法的实现, 包括导航定位、地图构建、障碍检测、状态监视, 并据此进行路径规划, 实时确定出下一步的运行动作, 如航行方向和航行速度。

运动控制层的作用是根据决策和规划层得到的运行动作指令, 采用一定的运动控制算法来解算出 UUV 各运动部件的具体运行参数, 然后传递命令给实体层的各运动执行部件, 从而使 UUV 完成上层系统所规划的运动路径。

实体层指安装在 UUV 上的推进器、航向控制舵机等运动执行设备以及其他传感器等设备, 所涉及的传感器通常有深度计、高度计、多普勒测速仪、光纤陀螺仪、三轴加速度计、北斗、摄像头、前视声呐和侧扫声呐等。

2 运动控制层的设计

2.1 通信总线的选择

UUV 控制系统中的各层之间的通信以及传感器的通信通常选用工业控制领域成熟的总线, 如 RS232 总线、RS485 总线、CAN 总线和 EtherCAT 总线。其中 CAN 总线因相较 RS232、RS485 总线有更高的可靠性; 相较 EtherCAT 总线具有低成本和易用性, 因而在工业控制领域中得到了更广泛的应用, 常被用在工业自动化、汽车、船舶、医疗设备、工业设备等领域^[10]。

CAN (controller area network) 总线是由德国 Bosch 公司研制开发的一种串行数据通信协议, 应用在汽车内部在

各部件之间进行数据交互。CAN 总线已被 ISO 国际标准组织制定为国际标准, 并且广泛应用于嵌入式系统和分布式控制领域。CAN 总线由 OSI 模型发展而来, 但是 CAN 总线只有物理层、数据链路层和应用层协议, 较简练的协议使得 CAN 总线具有较高的实时性^[11]。CAN 总线是对等总线, 总线上每个节点都可以主动发起总线访问, 每个节点都有优先级设定, 并支持点对点、点对多和广播等通信模式。CAN 总线的传输介质通常是传统的双绞非屏蔽线, 总线通信速率会影响总线通信长度, 在最高速率 1 Mbps 下的通信距离可达 40 m。CAN 总线节点在检测出错误后会主动退出总线, 使得其传输可靠性很高^[12]。

UUV 的控制系统具有分布式节点数量大的特点, 因为 UUV 为获得丰富的外界环境信息, 通常会挂载众多的各种传感器设备。众多传感器使 UUV 具备更好的任务执行能力, 智能 UUV 则更是如此。CAN 总线最高 1 Mbps 的传输速率对于 UUV 控制系统的运动控制信号和相关传感器数据信号足以满足需求。UUV 所携带的水下传感器一般比较昂贵, 且 UUV 所在的水下工作环境相对比较恶劣, 因而对控制系统通信链路的可靠性要求相对较高, 因为一旦通信环节出现故障, 将很可能对 UUV 造成难以挽回的损失。而 CAN 总线协议的传输层和数据链路层具有完善的错误检测和重发功能, 保障了数据通信的高可靠性, 很好地满足了工作环境要求。

因此本文设计的运动控制层选择 CAN 总线完成与决策规划层的控制指令数据交互, 并通过 CAN 总线实现推进器的运动控制通信和其他传感器的读取。

2.2 核心控制器的选择

意法半导体的 STM32 系列处理器是专为要求高性能、低成本、低功耗的嵌入式应用而设计的基于 ARM 公司 Cortex-M 的 32 位 Flash 微控制器。它为用户提供了很高的开发自由度, 既可以使用底层寄存器进行编程, 也可以很方便地使用官方提供的库文件进行编程, 两种编程方式都可以很方便地移植到同系列的 32 位产品中。STM32 系列处理器具有高性能、实时性好、低功耗和低电压操作等特性, 同时还具有易于开发和集成度高的特点。按内核架构分为主流产品、超低功耗产品和高性能产品。

本文选用 STM32F407ZGT6 型高性能微控制器作为 UUV 运动控制层的核心计算机, 它采用 Cortex M4 内核, 带 FPU 和 DSP 指令集, 最高运行频率可达 168 Mhz, 并且拥有 2 个 CAN、3 个 12 位 ADC、3 个 SPI、2 个全双工 I2S、3 个 IIC、6 个串口、1 个 10/100 M 以太网 MAC 控制器、12 个 16 位定时器、2 个 32 位定时器、1 个 RTC 等众多接口和资源, 完全能够满足运动控制层的接口需求和算力需求。

一般分布式控制系统从纵向看具有分层的特点, 且层与层之间通过网络总线通信, 从横向看则具有模块化分散的特点, 每个模块之间也是通过各种工业总线进行数据通信的。本文设计的 UUV 运动控制层通过 CAN 总线与决策

规划层通信,接收其下发的运控控制指令,通过另外一条 CAN 总线与实体层的推进器以及其他传感器进行通信,进行推进器驱动和传感器数据采集。一些传感器设备亦可通过 RS232 或者其他工业总线与更高的其他层进行数据交互。具体的运动控制层总线网络架构如图 2 所示。

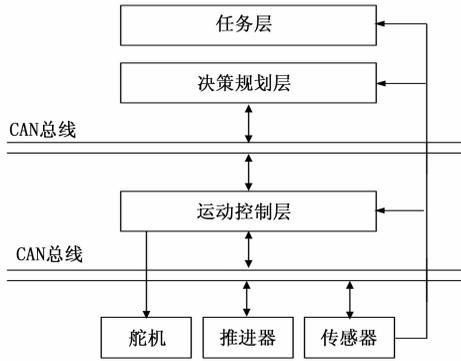


图 2 运动控制层总线网络架构

以 STM32F407ZGT6 为运动控制层核心控制器,设计两路 CAN 总线、2 路 RS232 总线和 1 路 485 总线、4 路 PWM 输出,并利用 IIC 接口外接一片 2 Kbit 存储空间的 EEPROM,用以保存舵机的初始偏差等掉电不丢失的参数。其中 EEPROM 实际电路如图 3 所示。

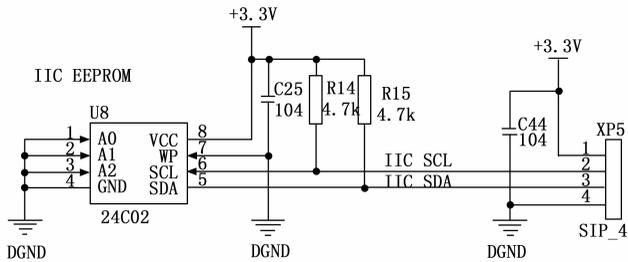


图 3 EEPROM 存储电路

2.3 舵机的控制设计

所谓舵机,其本质就是自带简易反馈系统的伺服电机,常见的舵机主要指的直流伺服电机,通过调节电机输入信号的 PWM 占空比可以实现电机较精准的舵机转动角度控制。PWM (pulse width modulation) 就是脉冲宽度调制,也就是占空比可变的脉冲波形。PWM 的占空比,就是指高电平保持的时间,与该 PWM 时钟周期时间之比。

舵机的控制一般需要一个 20 ms 左右的时基脉冲,该脉冲的高电平部分一般为 0.5~2.5 ms 内的角度控制脉冲部分,总间隔为 2 ms 的时间长度。

本文使用 D30 型水下舵机,该舵机是一种空心杯直流电机,耐压深度可达水下 300 m,额定工作电压为 7.4 V,额定扭矩为 15 kg·cm,转动角度范围为 270°,信号范围为 0.5~2.5 ms,信号频率为 50~300 Hz。

该舵机的接线定义为红色线为电源正极,黑色线为电源负极,白色线为控制信号输入线即 PWM 信号线。

STM32 通过输出 PWM 波即可完成舵机转动角度的控制。

STM32F407ZGT6 通过定时器产生 PWM 波形,其定时器除了 TIM6 和 TIM7,其他的定时器都可以用来产生 PWM 输出。其中高级定时器 TIM1 和 TIM8 可以同时产生多达 7 路的 PWM 输出。而通用定时器也能同时产生 4 路的 PWM 输出。本文设计的 UUV 运动控制层需要输出 4 路独立的 PWM 波形来分别控制 4 个舵机。因此 STM32F407ZGT6 有足够的定时器资源来输出 4 个独立的 PWM 波。

STM32F407ZGT6 通过定时器产生 PWM 波形的原理如图 4 所示。图中,我们假定定时器工作在向上计数 PWM 模式,且当 $CNT < CCR_x$ 时,输出 0,当 $CNT \geq CCR_x$ 时输出 1。那么就可以得到如图 4 的 PWM 示意图:当 CNT 值小于 CCR_x 的时候,IO 输出低电平 (0),当 CNT 值大于等于 CCR_x 的时候,IO 输出高电平 (1),当 CNT 达到 ARR 值的时候,重新归零,然后重新向上计数,依次循环。改变 CCR_x 的值,就可以改变 PWM 输出的占空比,改变 ARR 的值,就可以改变 PWM 输出的频率,这便是 STM32F4 的 PWM 输出原理。

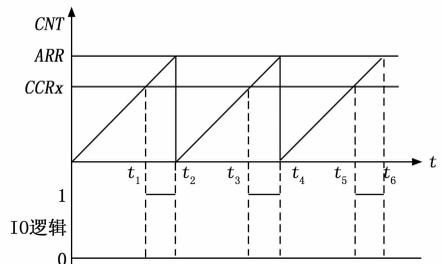


图 4 定时器产生 PWM 波形的原理

2.4 CAN 总线设计

ISO 国际标准组织先后制定了 ISO11898 和 ISO11519-2 两种 CAN 总线协议标准,其中 CAN 总线的高速通信标准为 ISO11898 标准,其通信速度范围为 125 kbps~1 Mbps, CAN 总线的低速通信标准为 ISO11519 标准,其通信速度范围为 125 kbps 以下。两种标准的数据链路层的定义是相同的,但是物理层定义不同。本文采用通信速率较高的 ISO11898 标准设计,其物理层特征如图 5 所示。

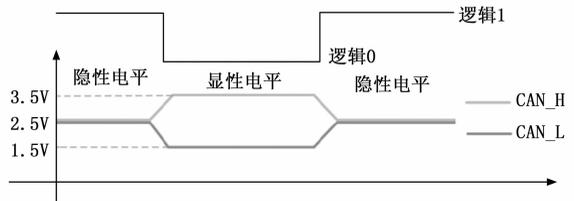


图 5 ISO11898 标准 CAN 总线物理层特性

从图 5 的 ISO11898 标准物理层特性可以看出,显性电平是 CAN_H 和 CAN_L 两根信号线电压之差 2.5 V 左右,对应逻辑为 0;而隐性电平是 CAN_H 和 CAN_L 两根信号线电压之差为 0 V,对应逻辑为 1。CAN 总线具有线与逻辑的特点,当总线上某一个 CAN 节点输出显性电平,

即逻辑 0 时, 那么总线上的线与逻辑就总为逻辑 0, 即总为显性电平, 因而 CAN 总线上显性电平具有优先权。同理隐性电平则需要总线上所有节点都输出隐性电平。另外, ISO11898 标准 CAN 总线协议的物理层要求在总线的两端各加一个 120 Ω 的终端阻抗匹配电阻, 以减少传输线上的回波反射, 从而提高信号的完整性。因此本文的 CAN 收发电路设计如图 6 所示。

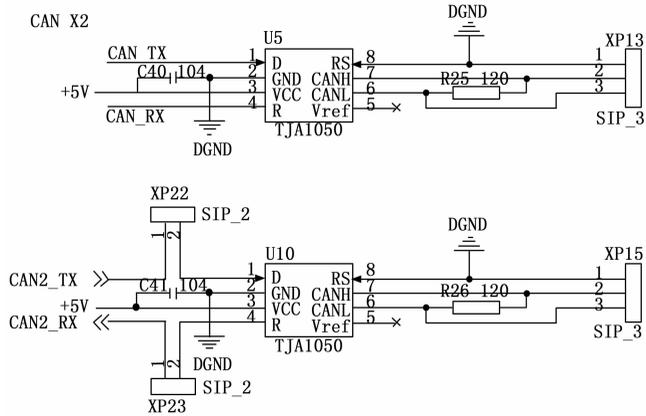


图 6 CAN 收发电路

如图 6 所示, STM32F407ZGT6 的两个 CAN 口都被利用起来, 一个 CAN 口用于与决策规划层通信, 另一个 CAN 口用于与实体层的推进器或者其他传感器通信。CAN 物理层接口芯片采用 TJA1050, 它是控制器区域网络 (CAN) 协议控制器和物理总线之间的接口, 该器件完全兼容 ISO11898 标准, 为总线提供差分发射能力并为 CAN 控制器提供差分接收能力。

3 X 型舵的控制

3.1 X 舵的优点

当代 UUV 的日益关注水下机动性能, 除了追求高航速之外, 航行器的机动灵活性也成为衡量航行器战术性能的重要指标, 而航行器尾舵作为航行的关键装置, 经过近几十年的演化和发展, 逐渐形成“十字型”和“X 型”两种流派, 尤其是近年 X 型尾舵日渐获得新一代航行器的青睐, 逐渐成为先进 UUV 的标配^[13-14]。

随着科技的发展, X 型尾舵的操控性复杂性、可靠性和安全性不可同日而语, 在克服控制方式复杂度等固有缺点之后, X 型尾舵操控的优势愈加突出。X 型尾舵的舵效要高于十字型尾舵, 因为 X 型舵 4 个舵面可以同时参加航行器单一方向的机动, 会提供更大的能量, 而且每个舵面都可以单独动作, 即便出现其中一两个舵面损坏的极端情况, 航行器仍然能够正常工作, 这便大大提高了控制系统的冗余性和安全性^[15]。

X 型舵的 4 个舵面都能在水平面和垂直面产生操纵力, 且 4 个舵面布置在航行器尾部的对角线上, 因此在不突出筒体艇身筒体尺寸的情况下, 舵面可以更好地让航行器完成坐底海床的动作, 不会撞坏底部舵面。因此更适合在浅

海海域活动, 靠岸也更安全, 同时十分有利于 UUV 的布放和回收操作。因此本文的 UUV 运动控制层针对 X 型舵设计完成打舵控制。

3.2 X 舵到十字舵的等效控制

X 舵布局方式如图 7 (a) 所示, 从尾部按顺时针方向看, 4 个独立舵舵角分别标记为 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 , 且规定向右打舵为正, 向左打舵为负。图 7 (b) 为十字舵布局方式, 其中 δ_s 、 δ_r 分别表示尾升降舵角和方向舵角^[16-18]。

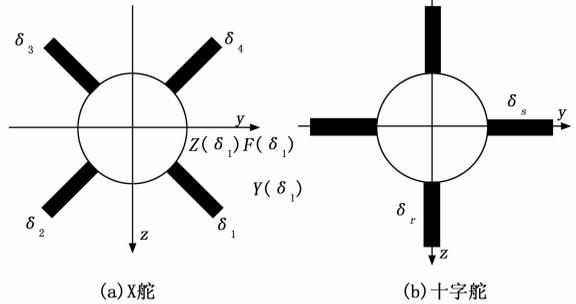


图 7 X 舵与十字舵布局方式

任意一个舵面偏转后都会产生一个空间力 F , 该力可以分解为公式 (1):

$$F(\delta_i) = \begin{cases} X(\delta_i) \\ Y(\delta_i) \\ Z(\delta_i) \\ K(\delta_i) \\ M(\delta_i) \\ N(\delta_i) \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

其中, X 、 Y 、 Z 为 X 舵舵力在艇体坐标轴上的分量, K 、 M 、 N 为坐标轴上的舵力矩分量。艇体只做潜浮运动时, 十字舵表达为 $\delta_s \neq 0$ 、 $\delta_r = 0$, X 舵表达如公式 (2) 所示:

$$\sum_{i=1}^4 F(\delta_i) = \begin{cases} \sum X(\delta_i) = X(\delta_s) \\ \sum Y(\delta_i) = 0 \\ \sum Z(\delta_i) = Z(\delta_s) \\ \sum K(\delta_i) = 0 \\ \sum M(\delta_i) = M(\delta_s) \\ \sum N(\delta_i) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

艇体只做转向运动时, 十字舵表达为 $\delta_r \neq 0$ 、 $\delta_s = 0$, X 舵表达如公式 (3) 所示:

$$\sum_{i=1}^4 F(\delta_i) = \begin{cases} \sum X(\delta_i) = X(\delta_r) \\ \sum Y(\delta_i) = Y(\delta_r) \\ \sum Z(\delta_i) = 0 \\ \sum K(\delta_i) = 0 \\ \sum M(\delta_i) = 0 \\ \sum N(\delta_i) = N(\delta_r) \end{cases} \quad (3)$$

X 型舵由于其空间布局方式, 不存在直接的方向舵和

升降舵，每个舵面的偏转都会引起航行器的潜浮与转向，因此需要多个（4 个或者 2 个）舵面的协同控制来实现单一方向的航向或者深度控制。以向左转向运动为例，同时打下舵（ $\delta_1 = \delta_2 < 0$ ）或者同时打上舵（ $\delta_3 = \delta_4 < 0$ ）或者同时打左舵（ $\delta_2 = \delta_3 < 0$ ）或者同时打右舵（ $\delta_1 = \delta_4 < 0$ ）在理论上都能实现艇体向左转，但考虑到艇体尾部对水流的影响，以及为避免艇体横倾，同时打左舵（ $\delta_2 = \delta_3 < 0$ ）是最佳方案^[19-20]。同理向右转向运动最好同时打右舵（ $\delta_1 = \delta_4 > 0$ ），上浮运动最好同时打上舵（ $\delta_3 = (-\delta_1) > 0$ ），下潜运动最好同时打下舵（ $(-\delta_1) = \delta_2 > 0$ ）。

4 实验与测试

将通用运动控制层控制器作为下位机与 UUV 尾段参照图 2 进行电气连接，其中上层通讯 CAN 总线通过仿真器与上位机电脑相连，下层 CAN 总线进行推进器控制，PWM 输出用于舵机控制。之后将 UUV 尾段置于水箱中进行运动控制测试，实测图如图 8 所示。

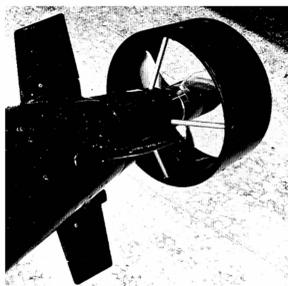


图 8 UUV 尾段实测图

主要测试项目和测试方法如表 1 所示，测试目的在于完成运动控制层的核心能力验证，即对上层通信和对下层运动控制。

表 1 测试项和测试方法

序号	测试项	测试方法
1	与上层 1 Mbps 通信	通过 CAN 总线与上位机进行 1 Mbps 数据交互
2	推进器推力控制	通过 CAN 总线控制推进器进行正推 5% 推力、反推 5% 推力控制
3	舵机打舵控制	通过 PWM 信号控制 X 舵进行上下左右打舵

下位机通过上层通讯 CAN 总线与上位机通信时需要自定义控制命令格式，此处 CAN 通信采用 1 Mbps 的通信速率，并通过标准数据帧格式进行通信，且其数据字段长度为 8 个字节，数据字段格式直接采用推进器通信协议里的定义，如图 9 所示。这样下位机在收到 CAN 总线数据帧后进行解析，如果是推进器的控制指令则直接转发给推进器控制器，从而完成推进器的控制测试。

同样，如果下位机在收到 CAN 总线数据帧后解析为打舵控制命令，则其携带数据被转换为 X 舵的 4 个舵机舵角的 PWM 控制量输出，从而完成舵机的控制测试。

1	2	3	4	5	6	7	8
控制命令				携带数据			
命令 2Byte		预留 0x00 数据类型					

LSB

MSB

图 9 数据字段格式

按照以上方法进行实验测试。测试结果表明本，采用该设计方案完成的通用运动控制层控制器能够实现 X 型舵的上下左右打舵操作，以及推进器的正推、反推控制，并且完成与上层通信的 1 Mbps 速率的 CAN 总线数据交互。达到了 UUV 运动控制层的设计目标。

5 结束语

以嵌入式系统 STM32 为核心构建的 UUV 运动控制层设计方案，符合分布式计算和模块化设计的原则，能够实现 UUV 实体层 X 型舵的打舵控制和推进器的推力控制以及同上层的通信，并能提供富裕的接口和算力进行各类传感器的数据交互。该设计方案具有较强通用性，提供了比较完整的 UUV 运动实体层和运动控制层解决方案。

本设计方案需要进一步完善 X 型舵的控制策略，解决例如单舵卡舵情况下的航行器运动控制问题^[21]。

参考文献：

- [1] 高 剑, 吴普国, 严卫生, 等. 便携式 AUV 分布式控制系统开发与试验 [J]. 控制工程, 2017, 24 (2): 315-320.
- [2] 杨青书. 基于 CAN 总线的 AUV 分布式控制系统设计与实现 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [3] 卫 民. 基于矢量推进器的 AUV 运动控制系统研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [4] 王千一. UUV 分布式系统软件测试方法的应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- [5] VASCONCELOS J F, SILVESTRE C, OLIVEIRA P, et al. Embedded UAV model and LASER aiding techniques for inertial navigation systems [J]. Control Engineering Practice, 2010, 18 (3): 262-278.
- [6] 孙现有, 焦诗健. 无人水下航行器发展与应用 [J]. 水雷战与舰船防护, 2012, 20 (2): 50-52.
- [7] 张 振. AUV 自救控制系统的设计与实现 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [8] 张宏伟, 李一平, 封锡盛. 一个面向异构多 UUV 协作任务的分布式控制系统 [J]. 机器人, 2008, 30 (2): 155-159.
- [9] 吴 迪. 分布式水下无人航行器搜捕任务协调方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [10] 许真珍, 王树新. 基于 CAN 总线的自治水下机器人控制系统 [J]. 机器人, 2006 (4): 448-452.
- [11] 杨培培, 赵诗雅, 刘瑞勇, 等. 基于 CAN 总线的 UUV 通信系统与仿真 [J]. 通信电源技术, 2015, 32 (5): 208-210.
- [12] PINHO L M, VASQUES. Reliable real-time communication in CAN networks [J]. IEEE Trans. on Computer (S0018-9340), 2003, 52 (12): 1594-1607.
- [13] 王淑瑛. 潜艇 X 舵小议 [J]. 船舶物资与市场, 1999 (2): 36

- 37.

[14] 蓝 白, 李 柯. 潜艇舵面设计基本原则 [J]. 兵器知识, 2011 (4): 16-19.

[15] 王京齐, 李亚楠. 潜艇 X 型尾操纵面的操纵特性 [J]. 船海工程, 2006 (2): 1-3.

[16] 胡 坤, 宗方勇, 庞晓楠. X 舵潜艇等效舵角转换装置设计研究 [J]. 船海工程, 2003 (6): 19-21.

[17] 胡 坤, 庞晓楠. X 舵潜艇等效舵角转换装置设计与仿真分析 [J]. 船舶, 2005 (3): 47-50.

[18] 胡 坤, 徐亦凡. X 舵潜艇空间运动仿真数学模型 [J]. 计算

机仿真, 2005, 22 (4): 50-52.

[19] 贾霆哲. UUV 姿态控制技术 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.

[20] GEDER J D, PALMISANO J. Fuzzy logic PID based control design and performance for a pectoral fin propelled unmanned underwater vehicle [C] //Control, Automation and Systems, 2008: 40-46.

[21] 王文琦. 潜艇艇升降舵卡舵事故的抗沉技术 [J]. 船舶科学技术, 1998 (6): 14-18.

(上接第 92 页)

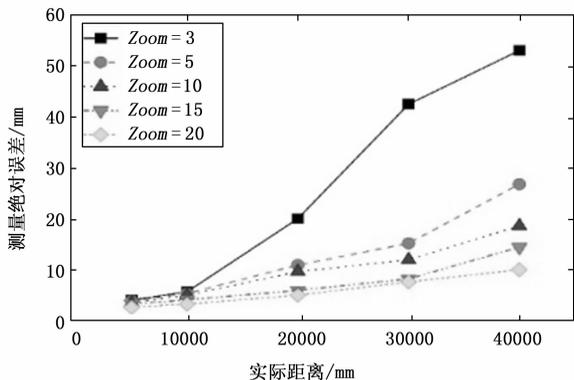


图 8 不同变焦值下实际距离与测量绝对误差变化关系图

平台和海康威视相机 SDK 开发包实现了一种范围可调的激光三角测距系统。本测距系统融合了 PTZ 相机水平 360° 全角度旋转、垂直 90° 翻转以及 23 倍光学变焦能力, 通过调节相机位姿及相机视场角 (59.5~2.9°), 有效扩大了基于机器视觉的激光三角测距范围, 实现了 40 m 范围内目标的精确测距, 单帧图像处理耗时为 29.95 ms, 满足激光除冰在线测量的要求。

参考文献:

[1] 刘 磊, 朱 晓. 激光除冰研究 [J]. 光散射学报, 2006, 8 (4): 379-385.

[2] 谷山强, 陈家宏, 蔡 炜, 等. 输电线路激光除冰技术试验分析及工程应用设计 [J]. 高电压技术, 2009, 35 (9): 2243-2249.

[3] 赵宇明, 张贵新, 罗 兵, 等. 大功率半导体激光除冰技术 [J]. 南方电网技术, 2011, 5 (5): 60-64.

[4] FARZANEH M, RYERSON C C. Anti-icing and deicing techniques [J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65 (1): 1-4.

[5] LUO J, ZHANG G, HE L, et al. Research on laser deicing technology for overhead line [C]. IEEE Energy Internet and Energy System Integration, 2019: 2424-2428.

[6] 韦 伟, 周凌翔, 刘 青. 一种便携式的红外测距系统 [J]. 电子设计工程, 2011, 19 (21): 40-42.

[7] 童 峰, 许水源, 许天增. 一种高精度超声波测距处理方法 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 1998 (4): 43-48.

[8] SHOJAEIPOUR S, MOHAMED H S, SHOJAEIPOUR A, et al. Robot path obstacle locator using webcam and laser emitter [J]. Physics Procedia, 2010, 5: 187-192.

[9] BURROWS D, HADWIN J. A scanned laser and tracking system for sea floor profiling and precision survey [C] // Ocean '73 - IEEE International Conference on Engineering in the Ocean Environment, 1973: 39-44.

[10] 李 高, 何元烈, 曾 碧. 三角测距激光雷达的光斑定位算法研究 [J]. 传感技术学报, 2016, 29 (11): 1692-1697.

[11] 蒋 明. 一种量程可调节的激光三角测距装置及方法 [P]. 湖北: CN202011073876.0, 2020.10.10.

[12] 陈念年, 张佳成, 范 勇, 等. 一种高精度单点激光三角测距方法 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (5): 984-986.

[13] 朱铮涛, 裴炜冬, 李 渊, 等. 基于远心镜头的激光三角测距系统研究与实现 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55 (3): 191-196.

[14] 张思祥, 乔龙伟, 周 围, 等. 基于激光三角测距的深基坑水平位移测量 [J]. 传感器与微系统, 2020, 39 (3): 127-130.

[15] 武泽键, 王会峰, 丁光洲, 等. 一种利用功率自适应的激光三角测距精度提高技术研究 [J]. 激光杂志, 2021: 1-11.

[16] PORTUGAL - ZAMBRANO C E, MENA - CHALCO J P. Robust range finder through a laser pointer and a webcam [J]. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2011, 281: 143-157.

[17] ZHANG X, YANG Y, LIU Z, et al. An improved sensor framework of mono-cam based laser rangefinder [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 201: 114-126.

[18] 钟俊平, 王美琴, 郑伊玫. 基于 LabVIEW 图像处理的激光测距系统 [J]. 佛山科学技术学院学报 (自然科学版), 2019, 37 (4): 43-47.

[19] 郭良奇, 蒋 明, 王邓志, 等. 激光淬火加工质量视觉检测系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (12): 23-26.

[20] 余兆钗, 张祖昌, 李佐勇, 等. 融合多颜色分量的舌图像阈值分割算法研究 [J]. 计算机应用与软件, 2019, 36 (5): 199-203, 248.