

文章编号: 1674 - 5566(2016)04 - 0607 - 06

DOI:10.12024/jsou.20151001570

## 海上网箱网衣检测用框架式 AUV 设计与试验

张金泉<sup>1</sup>, 胡庆松<sup>1</sup>, 申屠基康<sup>2</sup>, 姜亚洲<sup>3</sup>

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 宁波市海洋与渔业研究院, 浙江 宁波 315010; 3. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090)

**摘要:** 大型网箱(围网)养殖是我国对深远海水体资源利用的重要途径,网衣破损检测是网箱养殖可以正常运行的基础条件,利用低成本高可靠性的框架式 AUV 进行网衣破损检测是可行的技术方案之一。基于技术、成本和使用便利性等要求,提出了框架式 AUV 螺旋式网衣破损检测策略,对其进行了运动建模和动力计算,获得了控制方法及与海流等相关的工作条件。根据模型分析进行了框架式 AUV 系统参数设计,开发了 3 自由度 AUV 控制系统软硬件、水下视频监控装置及工作距离 1.5 km 的微波通讯系统。所研发系统在象山港海域大型网箱进行了现场试验,结果表明在流速小于 0.8 m/s 时,能够在大潮和小潮分别获得最远 0.9 m 和 1.5 m 的清晰视觉图像,可以方便地判断网衣破损情况,满足实际要求,为大规模推广应用打下了良好基础。

**关键词:** 网箱(围网)养殖; 框架式 AUV; 螺旋式巡查; 运动模型; 水下视频装置; 微波通讯

**中图分类号:** S 969      **文献标志码:** A

海水养殖是我国获取海洋类渔业资源的最主要方式<sup>[1]</sup>,网箱养殖以其集约化、高产量和可控的优势使其成为海上渔业养殖的主要形式<sup>[2-4]</sup>。目前,我国网箱养殖已经具有了相当规模,但主要以近海及湾内为主,水体流动性差,高密度养殖对近海海水及底泥的污染日益加剧<sup>[5-6]</sup>。深远海网箱(围网)养殖作为综合多项技术发展起来的养殖模式<sup>[7]</sup>,对东海外海及南海岛礁地区等深远海水体的利用有重要的战略意义,是我国海洋养殖实现可持续发展的重要方向<sup>[8]</sup>,网衣破损检测则是深远海网箱(围网)能够实施的重要技术支撑。

目前国内外已提出了一些网箱网衣检测方案。日本采用声呐技术,通过网箱内外的声呐反射图像的变化判断网衣状况,但系统耗能大、成本高,且不易判断具体破损位置<sup>[9-10]</sup>。挪威和美国多采用水下摄像技术,在网箱内部配置固定的带有云台的摄像头,对网箱整体进行视频监控判断网衣状况<sup>[11]</sup>,但由于区域范围大,对于海水能

见度要求过高,特别是深水低照度部分,难以良好实现。国内提出过在网衣网线中加入导线判断破损状况的方案,但并未进行实验验证<sup>[12]</sup>。目前国内大型网箱或围网主要以潜水员下水排查检测为主要方式,成本高且检查效率低,难以满足要求。考虑到水产行业的成本要求,从业人员实际现状,且深远海地区电能相对短缺,框架式 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)具有浮重力调节方便、成本低、抗浪性好、重量轻的特点,是解决这一问题的可行性技术方案之一。

框架式 AUV 方案技术难点主要包括有效的巡查模式、合理的结构与动力系统、关键模块的密封、水下视频拍摄与大带宽数据通讯等。针对国内主要采用的圆柱形网箱和围网,为能全方位检查所有的水下网衣,本文基于 AUV 转艏舵和浮沉舵功能提出了螺旋式巡查模式,在网衣遍历和可控性方面优势明显。进一步从抗浪流和续航能力方面着手进行了动力系统设计,形成了基于水下视频和微波通讯的较为完善的工作思路。

收稿日期: 2015-10-08      修回日期: 2016-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(青年)基金项目(51309150);宁波市科技攻关重大专项(2013C11014);农业部公益性行业专项(201303047);上海市科技兴农推广项目(2016-1-6-4)

作者简介: 张金泉(1990—),男,硕士研究生,研究方向为机械工程。E-mail: zhangjyq@126.com

通信作者: 胡庆松, E-mail: qshu@shou.edu.cn

### 1 框架式 AUV 工作模式设计与运动建模

水产行业特点决定了常规 AUV 可以实现网衣检测功能但成本高,实施难度大。为此,基于 AUV 的工作原理,本文提出了一种框架式 AUV 设计方案,功能设计集中于网箱中水下运动和视频拍摄及传输。鉴于绝大多数大型网箱(围网)圆柱形的特点,提出了螺旋式行进的工作模式,并对其进行运动建模以实现这一控制功能。

#### 1.1 框架式 AUV 工作模式的提出

图 1 为框架式 AUV 螺旋式工作模式, AUV 沿螺旋线方向向下行进,行进过程中拍摄图中阴影区域网衣的实时状况,经由整个行进过程,完成网衣整体的检测工作后改变浮沉舵角度实现自动上浮。AUV 路径规划是实现遍历检测功能的关键环节。系统水下摄像装置在象山港港湾内海水的试验表明,大潮情况下,当拍摄点距离网衣大于 0.9 m 时,视频模糊不清,无法进行网衣检测,小潮时拍摄点距离网衣 1.5 m 可以拍摄到满意的清晰度。本系统采用水下摄像头广角为 150 度,为保证拍摄区域竖直高度高于 1.5 m,需保证 AUV 离开网衣至少 0.5 m。根据以上边界条件,当给定网箱参数后,可得到最合适的行进路径及误差范围。

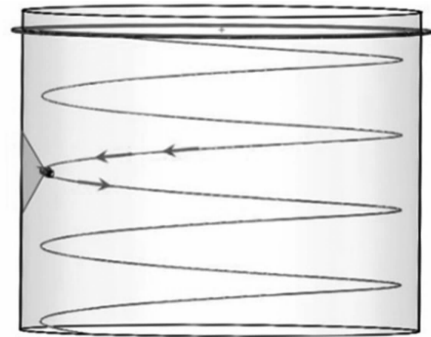


图 1 框架式 AUV 螺旋式工作模式

Fig.1 Frame-type AUV spiral motion mode

#### 1.2 框架式 AUV 运动模型构建与分析

运动建模是实施控制的基础,这里有静态坐标和 AUV 姿态动态坐标两个部分。AUV 的动力方程在动态坐标系中构建,而运动轨迹及 AUV 姿态则以大地静态坐标系为基准描述。本文以 AUV 出发点为原点建立大地坐标系,在此基础上可得到从自身动态坐标系转换为大地坐标系的转换矩阵:

$$T = \begin{pmatrix} T_v & 0 \\ 0 & T_\omega \end{pmatrix} \tag{1}$$

$$T_\omega = \begin{pmatrix} 1 & \tan\theta \sin\phi & \tan\theta \cos\phi \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{pmatrix} \tag{2}$$

$$T_v = \begin{pmatrix} \sin\varphi \cos\theta & -\cos\phi \sin\varphi + \cos\varphi \sin\phi \sin\theta \\ \sin\varphi \cos\theta & \cos\varphi \cos\phi - \sin\varphi \sin\phi \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \sin\phi \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \sin\varphi \sin\phi + \cos\varphi \cos\phi \sin\theta \\ -\cos\varphi \sin\phi + \cos\phi \sin\varphi \sin\theta \\ \cos\theta \cos\phi \end{pmatrix} \tag{3}$$

式中:  $\phi$ 、 $\theta$  和  $\varphi$  分别为 AUV 的横滚角、纵倾角和偏航角。

框架式 AUV 整体建模时参照 6 自由度的控制动力学模型<sup>[13]</sup>:

$$F = I(h)^{(-1)} \left\{ M(h) T^{(-1)} \left[ \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ \alpha_c \end{pmatrix} \right] + N(h, \dot{h}) \right\} \tag{4}$$

式中:  $\dot{h} = (u \ v \ w \ p \ q \ r)^T$ ;  $M(h)$ 、 $N(h, \dot{h})$  和  $F$  与 AUV 的整体动力学建模有关。

AUV 在航行过程中因水流等干扰存在,实际轨迹会存在偏差,为此,系统采用 PID 外控制回路和由动力学特性进行补偿的内控制回路相结合的方法,确保 AUV 实际行进路径始终处于误差允许范围内。系统控制结构如图 2 所示。

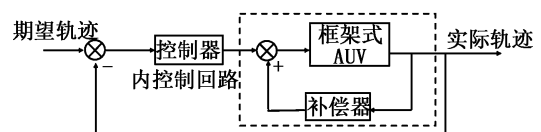


图 2 控制系统结构图

Fig.2 Control system structure diagram

通过分析 AUV 的位置和姿态偏差,从系统控制动力学模型分析,引入偏微分的比例方程及两个调节矩阵参数  $K_d$  和  $K_p$  (正定阵) 即可得到 AUV 控制的完整表达式:

$$F = I^{-1}(h) \left\{ M(h) T^{-1} \left[ \begin{pmatrix} \dot{x}_{d1} \\ \dot{x}_{d2} \end{pmatrix} + K_d \begin{pmatrix} \dot{x}_{d1} - \dot{x}_1 \\ \dot{x}_{d2} - \dot{x}_2 \end{pmatrix} + \right. \right.$$

$$K_p \left( \begin{matrix} e_p \\ e_o \end{matrix} \right) - \begin{pmatrix} 0 \\ \alpha_c \end{pmatrix} \Big] + N(h, \dot{h}) \Big\} \quad (5)$$

式中:  $x_{d1}$ 、 $x_{d2}$  为 AUV 在大地坐标系中的位置及姿态参数,  $x_{d1} = (x_d \ y_d \ z_d)^T$ ,  $x_{d2} = (\phi_d \ \theta_d \ \varphi_d)^T$ ;  $x_1$ 、 $x_2$  为其相同描述下的实际位置参数;  $e_p$ 、 $e_o$  分别为 AUV 位置和姿态误差<sup>[14]</sup>,  $e_p = x_1 - x_{d1}$ ,  $e_o = \frac{1}{2} \times (n \times n_d + O \times O_d + a \times a_d)$ 。

### 1.3 框架式 AUV 系统参数设计

基于上述运动模型, 设计了框架式 AUV 的基本结构, 整体由 1. 骨架、2. 浮心调块、3. 水下照明装置、4. 水下监控装置、5. 重心调块、6. 主控单元、7. 水下推进器、8. 转艏舵和 9. 浮沉舵共 9 部分组成, 如图 3。

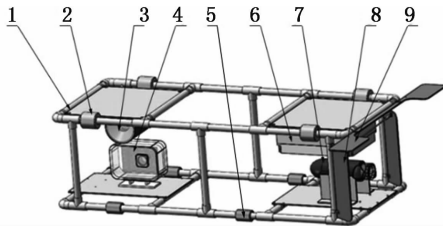


图 3 框架式 AUV 总体结构

Fig. 3 The general structure of frame-type AUV

框架式 AUV 整体动力由一个水下推进器提供, 通过控制尾端转艏舵和浮沉舵的角度实现螺旋式行进。该结构优势在于整体浮心和重心可以调节到合适的位置简化模型: 当浮心、重心及推进力调配到同一平面内之后, 要控制器完成固定参数的螺旋形轨迹, 只需考虑推进器、浮沉舵和转艏舵对应的 3 个自由度控制即可。由于 AUV 运行误差设计目标为分米级, 对精确度没有特别高的要求, 对其进行动力学模型分析时, 重力、浮力、推进力和水动力只做基本的研究即可。由于设装备重心与坐标原点重合, 可以将上述 4 个力从大地坐标系转化为局部坐标系描述。

AUV 总重  $G = 6\ 440\ \text{g}$ , 以其重心作为局部坐标系原点, 则其重力及重力矩可转换为:

$$\begin{pmatrix} F_G \\ \tau_G \end{pmatrix} = -65 \begin{pmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \sin\varphi \\ \cos\theta \cos\varphi \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

系统调节总排水体积约为  $6\ 510\ \text{cm}^3$ , 浮力约为  $B = 65\ \text{N}$ 。通过调块将 AUV 的浮心调整至其重心的正上方  $12\ \text{cm}$  处, 保证装备的稳定性。此时  $y_b = 0.12\ \text{m}$ , 则可计算在局部坐标系中的浮力及浮力矩:

$$\begin{pmatrix} F_B \\ \tau_B \end{pmatrix} = -65 \begin{pmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \sin\varphi \\ \cos\theta \cos\varphi \\ -y_b \cos\theta \cos\varphi \\ 0 \\ -y_b \sin\theta \end{pmatrix} \quad (7)$$

推力及水动力本身即为在局部坐标系中的描述, 在模型简化之后计算较为简单。系统采用 1 个水下推进器, 根据经验选取了额定转速  $2\ 000\ \text{r/min}$ 、推力  $T = 10\ \text{N}$  的水下推进器, 设置推进器施力点与重心的相对坐标为  $(-300, -8)$ ,  $x_b = -0.3$ 、 $y_b = -0.12$ 。根据  $T$ 、 $x_b$  和  $y_b$  即可得到推力和推力矩  $\begin{pmatrix} F_T \\ \tau_T \end{pmatrix}$ 。

本系统针对水动力模型进行了简化, 水动力主要由整体在  $0.6\ \text{m/s}$  时的流体阻力构成, 实验测得为  $6.7\ \text{N}$ 。根据舵片面积和偏转角度可得水动力和水动力矩  $\begin{pmatrix} F_K \\ \tau_K \end{pmatrix}$ 。

针对每一个深水网箱尺寸可推算出一个参数固定的 AUV 理想路径的数学描述, 结合上述重力、浮力、推力和水动力 4 个参数计算出两个调节矩阵参数  $K_d$  和  $K_p$ , 即可得到 AUV 控制方程的完整表达式。

## 2 系统工作模式及附属子系统设计

框架式 AUV 系统结构如图 4 所示, 主要由 1. AUV 主体单元、2. 通讯浮子和 3. 接收基站组成。在整个系统中, 主控单元控制水下推进器和浮沉、转艏舵的动作, 配合位置姿态传感器, 保证 AUV 完成螺旋式行进工作。通讯浮子浮于水面, 是能源供应系统和通讯发射端的支撑结构。水下监控装置在 AUV 运行过程中对其所经过路径的外侧网衣进行全方位拍摄, 所得视频资料通过发射单元传回接收基站, 通过传回的视频对网衣的观察判断, 实时完成网衣巡检工作。

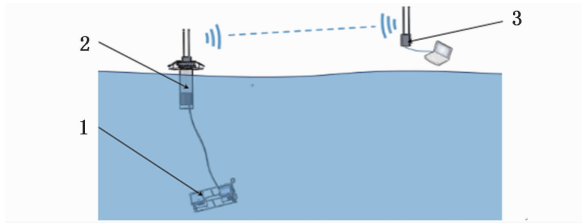


图4 框架式 AUV 系统工作模式

Fig. 4 Working mode of frame-type AUV system

## 2.1 水下视频监控装置设计

水下监控装置作为实现系统目标的关键环节,其视频质量和可靠性必须满足较为恶劣的海况要求。视频质量主要取决于装置的镜头、感光芯片及视频数字处理模块。由于海水能见度有限且随着下潜深度的增加照度逐渐变低,视频的清晰度及装置在低照度情况下的抗噪能力为技术关键。

水下监控装置配置选用雄迈 53H20PL-S 处理方案配合 SONY IMX222 超低照度 CMOS 传感器,视频分辨率  $1920 \times 1080$ ,最低使用照度  $0.001 \text{ Lx}$ ,信噪比大于  $50 \text{ db}$ 。镜头的选用主要考虑广角范围,装置选用 TAS-02512-3MP 广角镜头,配合所选 CMOS,水平视场角可达  $150^\circ$ ,镜头前配置可自动切换的 IR-CUT 双滤镜,自动调节光线强弱,得到最佳图像效果。装置可靠性主要考虑结构的密封和承压。外壳采用透光性能良好的有机玻璃加工,密封结构主要靠挤压丁腈橡胶圈完成。该装置在海上  $20 \text{ m}$  水深进行了  $48 \text{ h}$  抗压及密封测试,满足使用要求。

## 2.2 微波视频通讯系统设计

通讯装置是可以实时获得网衣信息的关键,水下视频资料通过图 4 中所示通讯浮子上全向天线发射到基地,经由接收端全向天线接收传输至显示终端,完成网衣的实时监测。由于海上几乎没有其他用户信号干扰,全向天线选用穿透距离好、覆盖距离远的  $2.4 \text{ GHz}$  频段。系统的发射和接收端均采用 LG-HWAP20 全向天线,保证在有恶劣天气干扰的情况下仍有较好的通讯效果。海上现场试验表明所设计的通讯系统距离在  $1500 \text{ m}$  内表现正常,可以满足实际需求。

## 2.3 能源供应系统设计

由于深远海网箱养殖的特殊性,系统不能依托陆地电缆进行电能供给,为了增加装置在梅雨等季节的实用性,需满足连续  $7 \text{ d}$  阴雨情况下保

证正常工作。本设计采用了太阳能电池板配合蓄电池的供能方案。为减少 AUV 负重,降低其控制难度,整个供能系统设置于通讯浮子上。蓄电池容量选用  $30 \text{ Ah}$ ,埋于整个浮子下方,通过低重心避免浮子在风浪情况下产生过大的倾斜和翻滚,采用 2 块  $20 \text{ W}$  ( $480 \times 350 \text{ mm}$ ) 太阳能板进行能量补充,对称分布于浮子顶端。综合各个用电设备的工作时间和功率,整套系统用电情况如表 1 所示。

表 1 系统用电量分析

Tab. 1 Electricity consumption analysis

部件 part	功率 P/W power	时间 T/h time	用电量 Ah Power consumption
推进器 propeller	90	0.3	2.25
控制器 controller	1.5	0.3	0.04
摄像头 camera	15	0.3	0.38
天线 antenna	12	0.3	0.3
照明灯 light	50	0.1	0.42
总计 total	-	-	3.39

装置所用 2 块功率为  $20 \text{ W}$  的太阳能板在正常光照情况下 ( $6 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5 \text{ lx}$ ),实测每小时可产生电量约  $3.5 \text{ Ah}$ ,充电能力有较大冗余。在连续  $7 \text{ d}$  阴雨天气时,总耗电量约为  $23.73 \text{ Ah}$ ,蓄电池用量按照  $80\%$  计算仍为  $24 \text{ Ah}$ ,可以满足系统使用。

## 3 系统现场应用试验

为验证装置的实用性,于 2015 年 7 月 12 日 - 18 日进行了多批次检测试验,试验地点选择为浙江省重要的海水养殖基地象山港海域<sup>[15]</sup>。试验在两组直径为  $20 \text{ m}$ 、深度为  $5 \text{ m}$  的养殖大黄鱼圆柱形网箱进行,网衣颜色为墨绿色和黑色两种,基地设在距离网箱  $270 \sim 360 \text{ m}$  的海上平台,如图 5 所示。



图 5 象山港海域圆形网箱

Fig. 5 Round offshore cage of Xiangshangang Bay

### 3.1 试验过程

试验分为两部分,首先针对小网目黑色网衣网箱,分别在流速为 0 m/s、0.4 m/s、0.8 m/s、1.2 m/s 的情况下进行了 4 组试验,对照比较流速对 AUV 行进路径的影响;然后在流速适中的 0.4 m/s 下,对墨绿色大网目网衣网箱进行检测试验,对照比较水下摄像装置对不同颜色网衣的识别度。本试验用海流计实时测得海流流速,每次试验过程中流速误差在  $\pm 0.05$  m/s 范围内时认定结果有效。图 6 展示了 AUV 从下水、启动、下潜即将消失到最后完成检测浮出水面的整个过程。

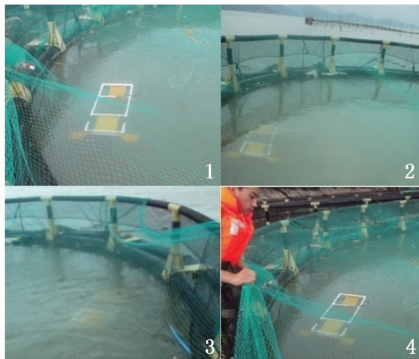


图 6 试验过程

Fig. 6 Experimental process

1. 下水; 2. 启动; 3. 下潜; 4. 上浮。  
1. entering; 2. commissioning; 3. diving; 4. floating.

### 3.2 试验结果及分析

水下摄像成像方面,图 7 显示了绿色大网目网衣(上图)和黑色小网目网衣(下图)的水下观测情况。在不同规格网目和颜色情况下,水下视频均清晰地展现出了网衣在水下的整体状况,达到了预期效果。

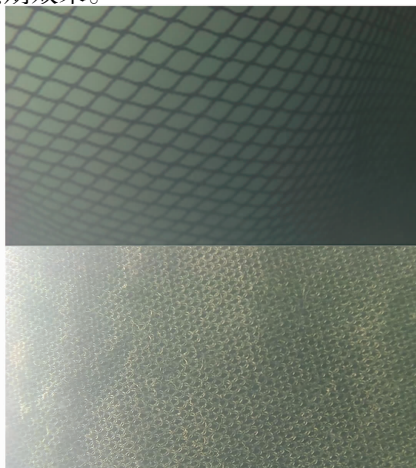


图 7 水下视频监控系统的观测图像

Fig. 7 Pictures from underwater video supervising system

抗流性能方面,当水流速度小于 0.8 m/s 时, AUV 运行相对稳定,和网衣的距离维持在 0.5 ~ 1.2 m 之间,满足拍摄要求;但是当水流速度大于 0.8 m/s 时,部分区域会出现脱离预定轨道的状况,导致 AUV 距离网衣过远,图像资料变模糊,无法进行检测工作。为了解决此问题,可以根据潮位确定装备的使用时间,利用每天的平潮和停潮期,在海流速度较小的时间段进行。

## 4 总结

本文开发了一个新的用于大型圆柱形网箱(围网)的低成本框架式 AUV,提出了低能耗高可靠的螺旋式工作模式,开发了相应的控制软硬件、水下视频与通讯和能源供应等附属系统。现场试验表明,在流速小于 0.8 m/s 的情况下,该系统可以较好地实现工作要求。针对大海流情况下实际轨迹发生偏移的问题,从控制系统出发,根据潮流变化规律,动态改变每天的工作时间,形成了合理的使用方法。现场试验结果表明了所研发装备的有效性,下一步通过图像处理技术自动实现破损辨识将能够使本系统更加完善。

## 参考文献:

- [1] 林德芳,关长涛,黄文强. 海水网箱养殖工程技术发展现状与展望[J]. 渔业现代化, 2002(4): 6-9.  
LIN D F, GUAN C T, HUANG W Q. Development and prospect of sea cage cultivation engineering technology[J]. Fishery Modernization, 2002(4): 6-9.
- [2] 张国胜,陈勇,张沛东,等. 中国海域建设海洋牧场的意义及可行性[J]. 大连水产学院学报, 2003, 18(2): 141-144.  
ZHANG G S, CHEN Y, ZHANG P D, et al. Significance and feasibility of establishing marine ranching in Chinese sea area[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2003, 18(2): 141-144.
- [3] 陈向明. 浅谈海水网箱养殖[J]. 科技致富向导, 2009(4): 118.  
CHEN X M. Discussion on sea cage cultivation[J]. Guide of Sci-tech Magazine, 2009(4): 118.
- [4] MOJJADA S K, IMELDA J, RAO P S, et al. Design, development and construction of open sea floating cage device for breeding and farming marine fish in Indian waters[J]. Indian Journal of Fisheries, 2013, 60(1): 61-65.
- [5] 赵仕,徐继荣. 海水网箱养殖对沉积环境的影响[J]. 黑龙江科技信息, 2009(18): 117-119.  
ZHAO S, XU J R. Effect of sea cage cultivation on sedimental environment [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2009(18): 117-119.



- [6] 韩芳, 霍元子, 杜霞, 等. 象山港网箱养殖对水域环境的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2012, 21(5): 825-830.  
HAN F, HUO Y Z, DU X, et al. Effect of fish-cage culture on water environment in Xiangshan harbor [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2012, 21(5): 825-830.
- [7] 景发歧. 深海网箱养殖与传统网箱养殖比较研究[J]. 河北渔业, 2010(3): 58-59, 61.  
JING F Q. The comparative studies between deep-sea cage culture and traditional cage culture [J]. Hebei Fisheries, 2010(3): 58-59, 61.
- [8] 宋玉刚, 郑雄胜. 深海网箱网衣清洗系统设计研究[J]. 机械研究与应用, 2012(2): 41-43, 46.  
SONG Y G, ZHENG X S. Design and study of the clean equipment of deep-sea net cage [J]. Mechanical Research & Application, 2012(2): 41-43, 46.
- [9] BJERKENG B, BORGSTROM R, BRABRAND A, et al. Fish size distribution and total fish biomass estimated by hydroacoustical methods: a statistical approach [J]. Fisheries Research, 1991, 11(1): 41-73.
- [10] HORNE J K, JECH J M. Multi-frequency estimates of fish abundance; constraints of rather high frequencies [J]. ICES Journal of Marine Science, 1999, 56(2): 184-199.
- [11] LOVE R H. Maximum side-aspect target strength of an individual fish [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1969, 46(3B): 746-752.
- [12] 叶盛, 王俊. 深水网箱网衣破损监测系统的设计 [J]. 农业机械学报, 2006, 37(4): 94-96, 118.  
YE S, WANG J. Design on cage net crack detecting system of sea cage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(4): 94-96, 118.
- [13] 边宇枢, 高志慧, 负超. 6 自由度水下机器人动力学分析与运动控制 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(7): 87-92.  
BIAN Y J, GAO Z H, YUN C. Dynamic analysis and motion control of 6-dof underwater robot [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(7): 87-92.
- [14] LUH J, WALKER M, PAUL R. Resolved-acceleration control of mechanical manipulators [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1980, 25(3): 468-474.
- [15] 董鹏, 张海波, 叶仙森, 等. 象山港中部海域大型底栖动物群落组成及多样性特征 [J]. 上海海洋大学学报, 2015, 24(3): 430-440.  
DONG P, ZHANG H B, YE X S, et al. Community structure and biodiversity characteristics of macrobenthos in the middle of Xiangshan bay [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2015, 24(3): 430-440.

## Frame-type AUV design and experiment for sea cage net damage detection

ZHANG Jinquan<sup>1</sup>, HU Qingsong<sup>1</sup>, SHENTU Jikang<sup>2</sup>, JIANG Yazhou<sup>3</sup>

(1. College of Engineering Science & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Research Institute of Marine and Fishery, Ningbo 315010, Zhejiang, China; 3. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** Large cage net (purse net) is a vital way to utilize the sea water resources of deep sea. Net damage detecting is the basic condition for its normal running. Low cost and high reliable frame-type AUV is a feasible technical method to conduct the function. Based on the requirement of technique, cost and convenient operation, this paper proposes a cage net spiraling detection strategy of frame-type AUV, sets up the motion model and computes the driving force. The control method and working conditions relative with water current etc. were obtained. According to the model analysis, this paper designs the frame-type AUV structure, develops the 3 degree of freedom control hard/software and underwater video supervising/microwave communication system with 1.5 km working distance. The equipment developed is verified in Xiangshangang Bay of Zhejiang Province, China. The results show the system can acquire clear cage net pictures within 0.9 m and 1.5 m distance in spring and neap tide respectively from underwater when the flow velocity is less than 0.8 m/s, and its damage situation can be easily judged, which meets the practical requirement and provides stable foundation for large scale application.

**Key words:** cage net (purse net) cultivation; frame-type AUV; spiraling detection; motion model; underwater video instrument; microwave communication