

# 水下机器人高度信息融合与欠驱动地形跟踪控制

李岳明<sup>†</sup>, 万 磊, 孙玉山, 张国成

(哈尔滨工程大学 水下机器人技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 研究了配置高度计和多普勒速度计(DVL)的欠驱动水下机器人地形跟踪控制问题. 采用Takagi-Sugeno推理方法对高度计和DVL两种传感器的高度信息进行融合, 提高了高度信息感知能力. 将地形跟踪分为速度控制和深度控制问题, 分别使用S面控制方法设计速度控制器和反步法设计欠驱动深度控制器. 最后, 通过实际海洋实验对研究的方法进行了验证, 实验结果表明该文提出的方法是有效的.

**关键词:** 水下机器人; 地形跟踪; 反步法; S面控制

中图分类号: TP24 文献标识码: A

## Altitude information fusion and bottom-following control for underactuated autonomous underwater vehicle

LI Yue-ming<sup>†</sup>, WAN Lei, SUN Yu-shan, ZHANG Guo-cheng

(National Key Laboratory of Science and Technology on Autonomous Underwater Vehicle,  
Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China;  
College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China)

**Abstract:** A bottom-following control problem is studied for an underactuated autonomous underwater vehicle (AUV) with an altimeter and a doppler velocity log (DVL). The Takagi-Sugeno decision approach fuses the altitude information from altimeter and DVL, which improves the altitude information perception capacity of AUV. The bottom-following control is decomposed into forward speed control and depth control. The forward speed controller and the underactuated depth controller are solved by the S-plane control method and the backstepping method, respectively. The proposed method is tested in a real sea trial; the result shows that the method is feasible and effective.

**Key words:** autonomous underwater vehicle; bottom-following; backstepping; S-plane control

## 1 引言(Introduction)

水下机器人在执行一些任务时, 例如海底管线跟踪检测、海床地质调查、海底磁场异常区探测等, 需要保持距海底一定高度按照一定的航线航行, 即地形跟踪. 和定深航行相比, 水下机器人地形跟踪难点在于: 1) 海底崎岖不平, 地形变化剧烈导致跟踪困难; 2) 声学传感器对高度测量结果噪声大; 3) 水下机器人垂向运动的机动能力有限. 例如, 日本r2D4潜器对印度洋中洋脊进行探测<sup>[1]</sup>时, 需要保持定高航行, 从实验结果曲线上看, 高度偏差有时可达100 m以上, 因此研究水下机器人地形跟踪控制问题具有重要的应用价值.

文献[2]中INFANTE机器人配置了两个声学高度计: 垂直布置的高度计提供当前高度信息, 倾斜布置的高度计提供超前高度信息, 通过构造预测控制器

实现地形跟踪, 进行了仿真实验. 文献[3]采用改进的径向基函数神经网络设计地形跟踪控制器, 克服了系统参数变化及水动力时变性, 使系统状态偏差渐进稳定, 通过两个水下剖面的仿真实验验证了控制器的有效性. 文献[4]考虑了海流干扰和系统参数摄动影响, 采用迭代方法, 设计滑模增量反馈控制器, 实现了欠驱动水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV)地形跟踪控制, 同时避免了AUV俯仰舵的抖振现象, 减小了输出反馈控制的稳态误差与超调问题, 仿真实验表明, 所设计的控制器能够适应AUV系统的模型参数摄动及海流干扰.

本文研究了基于高度信息融合的水下机器人地形跟踪问题, 着重解决复杂海洋环境下高度信息获取与欠驱动定高航行控制. 最后通过海洋实验进行了验证.

收稿日期: 2012-03-04; 收修改稿日期: 2012-07-01.

<sup>†</sup>通信作者. Tel.: +86 0451 82568056.

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2008AA092301-2); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HEUCFZ1003); 中国博士后科学基金资助项目(20100480964).

## 2 地形跟踪运动建模(Bottom-following motion model)

本文研究对象为流线型回转体, 舵部带“十”字尾翼结构, 每个尾翼布置一个深水无刷导管桨, 采用锂离子电池作为能源, 搭载光纤罗经(fibre optic gyroscope, FOG)、深度计、多普勒速度计(doppler velocity log, DVL)、高度计等传感器。水下机器人地形跟踪如图1所示。图1中: 下方实曲线代表水底, 虚曲线代表目标航迹,  $O$ 点至水面距离 $d$ 为机器人当前深度,  $O$ 点至 $B$ 点为高度 $h$ ,  $A$ 点至 $B$ 点为目标高度 $h_d$ , 则高度偏差 $h_e = h - h_d$ 。

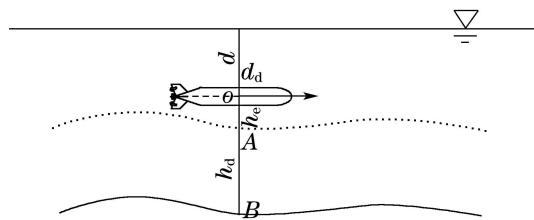


图1 地形跟踪示意图

Fig. 1 Bottom-following schematic

本文主要研究机器人垂直面运动, 因此忽略横移、横摇、转艏运动对垂直面的影响。垂直面运动模型<sup>[5]</sup>如下:

$$\begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & -X_{\dot{w}} & mz_g - X_{\dot{q}} \\ -X_{\dot{w}} & m - Z_{\dot{w}} & -mx_g - Z_{\dot{q}} \\ mz_g - X_{\dot{q}} - mx_g - Z_{\dot{q}} & I_y - M_{\dot{q}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -X_u & -X_w & -X_q \\ -X_{\dot{w}} & -Z_{\dot{w}} & -Z_q \\ -X_q & -Z_q & -M_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(m - X_{\dot{u}})u \\ 0 & (Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}}) & mx_g u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ BG_z \sin \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Z \\ \tau_M \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中:  $[u \ w \ q]^T$  为运动状态变量, 分别代表纵向速度、升沉速度和俯仰角速度,  $m$  为机器人质量,  $X_{(\cdot)}$ ,  $Z_{(\cdot)}$ ,  $M_{(\cdot)}$  为水动力导数,  $I_{(\cdot)}$  为转动惯量,  $x_g$ ,  $z_g$  为重心坐标,  $G_z$  为稳心高,  $\tau_{(\cdot)}$  为控制力(矩)。

## 3 高度信息处理(Altitude information processing)

机器人距水底高度信息可使用高度计直接测量得到。和大多数水声传感器一样, 高度计容易受到环境干扰, 水深较浅时还会产生多途效应; 再者高度计对于载体运动姿态要求也较高, 载体剧烈摇摆时高度计会失效。因此, 仅依靠高度计获取准确稳定的高度信息困难较大。一般可考虑传感器冗余配置, 即

使用多个不同工作原理的传感器对同一信息进行获取。综合考虑成本及载体设计因素, 一般采用多传感器信息融合的方法, 即对多个传感器信号中的同一信息进行综合处理, 得到较为准确的结果。

为了得到高品质的高度信息, 本文采用高度计与DVL高度信息融合的方法。DVL除了获得载体相对于水底的运动速度外, 还可以获得探测范围的信息。从实验结果上看, 该信息从一定意义上反应了载体的高度信息。同时, DVL具有4个独立的探测单元, 属于冗余配置, 具有较高的稳定性。

通过实验发现, 高度计获得的高度信息较为精确, 但是稳定性稍差, 经常受到干扰而失效; DVL提供的高度信息较为稳定, 能够抵抗一定的外界干扰, 但是精度不高, 不能精确反应出高度信息的细微变化。针对这两种传感器各自的优缺点, 进行高度信息融合, 可得到稳定精确的高度信息。

本文使用Takagi-Sugeno(T-S)推理<sup>[6]</sup>对高度计( $h_{\text{hgh}}$ )和DVL( $h_{\text{dvl}}$ )的高度信息进行融合。推理的前件为高度计数据有效率 $p$ , 该有效率是指最近的一段时间内数据有效程度, 采用式(2)进行计算。

$$p = \sum_{i=t}^{t-n} r_i a_{ri} / \sum_{i=0}^n r_i, \quad (2)$$

式中:  $r_i$  为第 $i$ 个历史信息权值, 时间越近该值越大;  $a_{ri}$  代表第 $i$ 个历史时刻的信息是否有效, 高度计信息有效值为1, 否则值为0。本文所选 $n = 9$ , 最近10个历史信息权值由近至远依次为{1.0, 0.81, 0.64, 0.49, 0.36, 0.25, 0.16, 0.09, 0.04, 0.01}。

高度计数据有效率 $p$ 隶属度函数如图2所示。

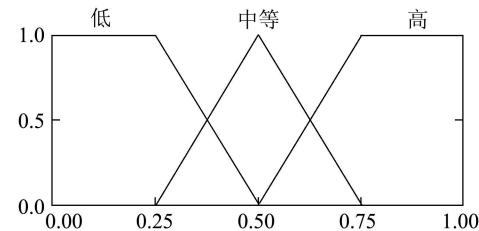


图2 数据有效率隶属度函数

Fig. 2 Membership function of data efficient

3条模糊规则如下:

R1: IF  $p$  is good, THEN  $H_1(h_{\text{hgh}}, h_{\text{dvl}}) = h_{\text{hgh}}$ .

R2: IF  $p$  is middle, THEN

$$H_2(h_{\text{hgh}}, h_{\text{dvl}}) = h_{\text{hgh}}p + h_{\text{dvl}}(1 - p).$$

R3: IF  $p$  is bad, THEN  $H_3(h_{\text{hgh}}, h_{\text{dvl}}) = h_{\text{dvl}}$ .

推理强度:  $W_i = \mu_{pi}$ .

推理结果精确量:

$$h = \sum_{i=1}^3 W_i H_i(h_{\text{hgh}}, h_{\text{dvl}}) / \sum_{i=1}^3 W_i. \quad (3)$$

当高度计信息无效时, 使用高度计信息估计值代

替测量值。

使用T-S推理可以使高度信息更为平滑,同时能够有效地融合高度计和DVL的高度信息,提高系统抗干扰能力。

#### 4 控制器设计(Controller design)

本文研究对象由于缺失垂向控制,具有欠驱动特性。为了实现定高航行,采用解耦的方式,即设计一个速度控制器和欠驱动深度控制器。可采用S面控制<sup>[7]</sup>方法设计速度控制器,采用反步法设计欠驱动深度控制器。

##### 4.1 纵向速度控制器设计(Forward speed controller design)

S面控制方法集合了模糊控制与PID控制的优点,经过实验证明该方法非常适合水下机器人运动控制。S面控制器表达式如下:

$$f = \frac{2}{1 + \exp(-k_1 e - k_2 \dot{e})} - 1 - \Delta f, \quad (4)$$

其中:  $e$ 和 $\dot{e}$ 分别代表输入控制器的偏差和偏差变化率,需要进行归一化处理;  $k_1, k_2$ 为控制参数,分别对应PD控制的比例参数与微分参数;  $\Delta f$ 为积分调整项;  $f$ 为归一化的控制输出。

参考文献[8-9],设计积分S面纵向速度控制器。对于S面纵向位置控制器,偏差和偏差变化率分别为 $e = x_d - x, \dot{e} = \dot{x}_d - \dot{x}$ 。为了得到定速航行控制器,可将S面纵向位置控制器的阶跃输入替换为斜坡输入。假设期望速度为 $u_d$ ,则位置偏差 $e = x_d(t) - x(t) = \int(u_d - u)dt$ ,偏差变化率 $\dot{e} = \dot{x}_d - \dot{x} = \int(\dot{u}_d - \dot{u})dt$ 。代入到S面控制器有

$$f = \frac{2}{1 + \exp\{\int[-k_1(u_d - u)]dt + \int[-k_2(\dot{u}_d - \dot{u})]dt\}} - 1. \quad (5)$$

S面控制器表达式的泰勒展开为

$$S(x) = -\frac{x}{2} + \frac{x^3}{24} - \frac{x^5}{240} + \dots + \frac{2^{2n}(2^{2n}-1)B_{2n}(-x/2)^{2n-1}}{(2n)!} + \dots + |x| < \pi, \quad (6)$$

式中 $B_n$ 为第 $n$ 项伯努利数。忽略一阶以上的高阶小量,可得 $S(x) \approx -x/2$ ,那么有

$$\begin{aligned} S(-k_1 e - k_2 \dot{e}) &\approx -\frac{-k_1 e - k_2 \dot{e}}{2} = \\ &= -\frac{\int -k_1(u_d - u)dt - \int k_2(\dot{u}_d - \dot{u})dt}{2} = \\ &= \int -\frac{-k_1(u_d - u) - k_2(\dot{u}_d - \dot{u})}{2} dt \approx \end{aligned}$$

$$\int S[-k_1(u_d - u) - k_2(\dot{u}_d - \dot{u})]dt.$$

定义速度偏差 $e_u = u_d - u$ ,速度偏差变化率 $\dot{e}_u = \dot{u}_d - \dot{u}$ ,因此,S面速度控制器表达式为

$$f = \int \left\{ \frac{2}{1 + \exp[-(k_1 e_u - k_2 \dot{e}_u)]} - 1 \right\} dt. \quad (7)$$

##### 4.2 高度控制器设计(Altitude controller design)

由于高度属于深沉自由度控制问题,因此将高度偏差转化为深度偏差,即定义目标深度 $d_d$ ,使 $d_d = d + h_e$ 。

忽略耦合运动影响,假设升沉运动是稳定的,考虑纯俯仰运动过程,于是有

$$\begin{cases} (I_y - M_{\dot{q}})\dot{q} - M_q q + BG_z \sin \theta = \tau_M, \\ \dot{d} = w \cos \theta - u \sin \theta, \\ \dot{\theta} = q. \end{cases} \quad (8)$$

参考文献[10],使用反步法设计欠驱动深度控制器。考虑到模型误差及载体浮力变化,定高航行过程中可能会存在一定的误差。为了消除该偏差,可以设定目标纵倾角 $\theta_d$ ,引入虚拟控制 $z_1$ ,将垂向偏差和纵倾偏差耦合在一起:  $z_1 = (d - d_d) + \lambda(\theta - \theta_d)$ ,  $\lambda > 0$ 。

定义Lyapunov函数

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2, \quad (9)$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= z_1 \dot{z}_1 = \\ &= z_1(w \cos \theta - u \sin \theta - w_d + \lambda q - \lambda q_d), \end{aligned} \quad (10)$$

其中:  $w_d = \dot{d}_d$ ,  $q_d = \dot{\theta}_d$ 。定义 $\lambda q = \alpha_1 + z_2$ ,代入式(10)有

$$\dot{V}_1 = z_1(\alpha_1 + z_2 + w \cos \theta - u \sin \theta - w_d - \lambda q_d).$$

定义 $\alpha_1 = u \sin \theta - w \cos \theta + w_d - k_3 z_1 + \lambda q_d$ ,  $k_3 > 0$ ,则式(10)为 $\dot{V}_1 = -k_3 z_1^2 + z_1 z_2$ 。定义Lyapunov函数

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2, \quad (11)$$

则有 $\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 = -k_3 z_1^2 + z_1 z_2 + z_2(\lambda \dot{q} - \dot{\alpha}_1)$ 。

将式(8)代入式(11)有

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -k_3 z_1^2 + z_1 z_2 + z_2 \left[ \frac{\lambda}{I_y - M_{\dot{q}}} (\tau_M + \right. \\ &\quad \left. M_q q - BG_z W \sin \theta) - \dot{\alpha}_1 \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

采用如下控制律:

$$\begin{aligned} \tau_M &= -M_q q + BG_z W \sin \theta + \\ &\quad \frac{I_y - M_{\dot{q}}}{\lambda} (\dot{\alpha}_1 - z_1 - k_4 z_2), \quad k_4 > 0, \end{aligned} \quad (13)$$

则 $\dot{V}_2 = -k_3 z_1^2 - k_4 z_2^2 \leq 0$ 。

因此 $(z_1, z_2)$ 是渐近稳定的。

下面讨论 $\theta_d$ 的选择问题。考虑到水下机器人运动强非线性的影响,  $\theta_d$ 的选择需要综合考虑航行速度、剩余浮力、高度偏差、地形变化等诸多因素, 因此不能给出一个清晰的表达式。为此, 本文采用自适应调整 $\theta_d$ 的方式, 尽量提高地形跟踪的精度。

定义 $\theta_d = k_5 \theta_{d1} + k_6 \theta_{d2}$ , 其中 $\theta_{d1}$ 为积分项, 即 $\theta_{d1} = \int (d - d_d) / \lambda dt$ ;  $\theta_{d2}$ 为前馈项, 即

$$\theta_{d2} = \arctan \frac{\Delta h}{\Delta l} \approx \frac{\dot{h}}{u},$$

表示机器人前进 $\Delta l$ 距离后高度改变 $\Delta h$ 时目标纵倾角的变化量;  $k_5, k_6$ 为比例参数。

## 5 实验结果(Results of experiments)

本文研究对象在大连海域进行了实验。实验海域受季风影响, 涌浪较大, 对实验造成很大的干扰。表1给出了控制器采用的主要系统参数。图3给出了高度信息融合结果, 图4给出0.5 m/s速度控制结果, 图5给出了定高7 m航行过程中机器人深度、高度、地形剖面信息。

表1 主要的模型参数

Table 1 Primary model parameter

参数	数值	单位	参数	数值	单位
$I_y$	7580.0	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	$M'_q$	-0.00205	—
$Z'_w$	-0.07634	—	$M'_q$	-0.02198	—
$d$	5.0	m	$G_z$	0.094	m
$Z'_w$	-0.02718	—			

注: 带上标'的参数为无量纲化参数。

由图3可以看出高度计受环境干扰强烈, 经常出现无效的现象, 使用T-S推理方法可有效融合高度计与DVL的高度信息, 实现了高度计失效时对高度信息的恢复。由图4可以看出速度控制基本稳定, 超调较小。由图5可看出定高航行过程中高度保持较为稳定, 偏差小于1 m, 实现了水下机器人地形跟踪运动控制功能, 但是存在一定的稳态误差。该稳态误差可能是由于航速太低, 艇体水动力不够, 导致高度控制不够精确。

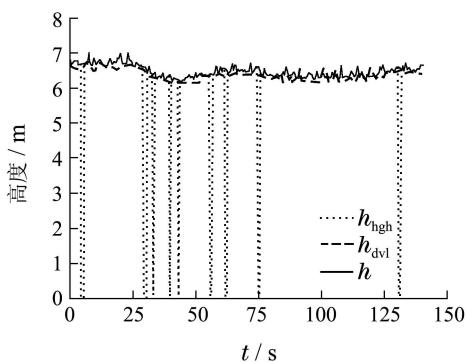


图3 高度信息融合结果

Fig. 3 The result of altitude information fusion

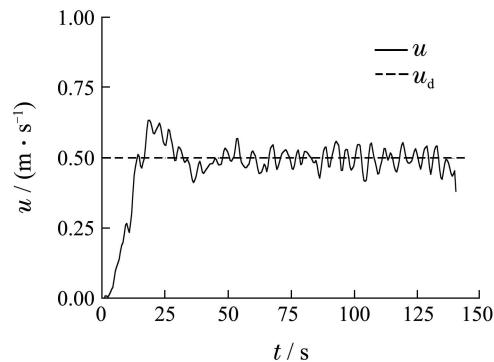


图4 速度控制结果

Fig. 4 The result of forward speed control

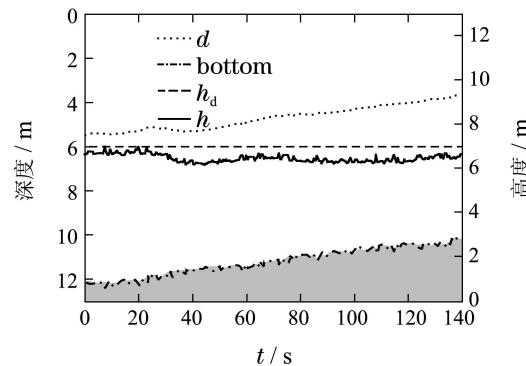


图5 地形跟踪控制结果

Fig. 5 The result of bottom-following control

## 6 结语(Conclusions)

本文研究了欠驱动水下机器人地形跟踪控制问题。针对高度计受环境干扰强烈而经常失效的问题, 采用T-S推理方法对高度计和DVL两种传感器的高度信息进行融合, 提高了复杂海洋环境下机器人状态感知能力。采取解耦方式, 利用S面控制方法设计了速度控制器, 使用反步法设计深度控制器, 实现了欠驱动地形跟踪控制。实际海洋实验结果表明, 本文研究的控制方法是有效的。

## 参考文献(References):

- [1] TAMAKI U, KENSAKU T, AKIRA A, et al. Dives of AUV "r2D4" to rift valley of central Indian mid-ocean ridge system [C] //Oceans 2007 Europe International Conference. Aberdeen: IEEE, 2007: 1078 – 1083.
- [2] NUNO P, CARLOS S, RITA C, et al. A bottom-following preview controller for autonomous underwater vehicles [C] //Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control. San Diego: IEEE, 2006: 715 – 720.
- [3] BIAN X Q, ZHOU J J, JIA H M, et al. Adaptive neural network control system of bottom following for an underactuated AUV [C] //Washington State Conference and Trade Center. Seattle: IEEE, 2010.
- [4] 边信黔, 程相勤, 贾鹤鸣, 等. 基于迭代滑模增量反馈的欠驱动AUV地形跟踪控制 [J]. 控制与决策, 2011, 26(2): 289 – 292.  
(BIAN Xinqian, CHENG Xiangqin, JIA Heming, et al. A bottom-following controller for underactuated AUV based on iterative sliding and increment feedback [J]. Control and Decision, 2011, 26(2) : 289 – 292.)

- [5] THOR I F. *Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships Rigs and Underwater Vehicles* [M]. Trondheim: Marine Cybernetics AS, 2002: 111 – 113.
- [6] 汤兵勇, 路林吉, 王文杰. 模糊控制理论与应用技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 16 – 27.  
(TANG Bingyong, LU Linji, WANG Wenjie. *Fuzzy Control Theory and Application Technology* [M]. BeiJing: Tsinghua University Press, 2002: 16 – 27.)
- [7] 刘学敏, 徐玉如. 水下机器人运动的S面控制方法 [J]. 海洋工程, 2001, 19(3): 81 – 84.  
(LIU Xuemin, XU Yuru. S control of automatic underwater vehicles [J]. *Ocean Engineering*, 2001, 19(3): 81 – 84.)
- [8] 甘永, 王丽荣, 刘建成, 等. 水下机器人嵌入式基础运动控制系统 [J]. 机器人, 2004, 26(3): 246 – 249.  
(GAN Yong, WANG Lirong, LIU Jiancheng, et al. The embedded basic motion control system of autonomous underwater vehicle [J]. *Robot*, 2004, 26(3): 246 – 249.)
- [9] 李岳明, 庞永杰, 万磊. 水下机器人自适应S面控制 [J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(2): 195 – 200.  
(LI Yueming, PANG Yongjie, WAN Lei. Adaptive S plane control for autonomous underwater vehicle [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2012, 46(2): 195 – 200.)
- [10] THOR I F, MORTEN B, ROGER S. Line-of-sight path following of underactuated marine craft [C] // *Proceedings of the 6th IFAC Conference on Maneuvering and Control of Marine Craft*. Girona, Spain: Elsevier, 2003: 244 – 249.

### 作者简介:

李岳明 (1983–), 男, 博士研究生, 从事智能水下机器人运动控制研究, E-mail: each-day@163.com;

万 磊 (1964–), 男, 研究员, 博士生导师, 从事智能水下机器人控制系统开发, E-mail: wanlei@hrbeu.edu.cn;

孙玉山 (1973–), 男, 副教授, 从事智能水下机器人导航与控制研究, E-mail: sunyushan@hrbeu.edu.cn;

张国成 (1983–), 男, 博士研究生, 从事智能水下机器人运动控制研究, E-mail: zhangguocheng168@126.com.