

文章编号: 1002-0446(2005)02-0168-05

## AUV 自主导航航位推算算法的研究\*

冯子龙<sup>1,2</sup>, 刘健<sup>1</sup>, 刘开周<sup>1</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 对 AUV (Autonomous Underwater Vehicle) 自主导航的航位推算算法做了进一步研究并加以改进, 以提高其自主导航精度。然后, 利用 AUV 湖试所获得的数据, 对本文提出的修正算法进行了验证。结果表明, AUV 的自主导航精度得到很大提高, 可以用于修正原来的自主导航算法。

**关键词:** 带遗忘因子的递推最小二乘滤波; 最小二乘辨识; 自主导航; AUV

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** B

### Dead Reckoning Method for Autonomous Navigation of Autonomous Underwater Vehicles

FENG Zi long<sup>1,2</sup>, LIU Jian<sup>1</sup>, LIU Kai-zhou<sup>1</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The dead reckoning method of autonomous navigation of AUV (autonomous underwater vehicle) is studied to improve the performance of the navigation system. A test is made on this method with the data from the lake test of AUV, and the results demonstrate that the navigation precision is evidently improved. Hence, this developed method can be applied to revise the original method for autonomous navigation of AUV.

**Keywords:** recursive least square filtering with forgetting factor; least-square identification; autonomous navigation; AUV

#### 1 引言 (Introduction)

目前水下机器人导航系统主要有: INS(惯导系统)、多普勒导航系统、GPS(全球定位系统)等。INS 价格较贵, 在没有修正信息的情况下难以满足长时间、远距离导航定位精度的要求; 多普勒导航系统与惯导系统一样, 同属于航位推算类系统, 根据得到的地速信息推算位置, 误差自然也是随着时间而积累的; 70 年代发展起来的 GPS 全球导航定位系统, 能够提供很高的定位精度, 几十米以内的定位精度基本上不受时间的限制, 但是, AUV 绝大部分时间在水下航行, 而 GPS 信号在水中迅速衰减, 所以, AUV 只有浮出水面, 才能接收到 GPS 信号; 此外, AUV 进行远距离自主航行时, 地球形状的不规则性, 各种导航传感器的安装偏差等, 也降低了 AUV 自主导航的精度。

针对以上问题以及实际工程需要, 采用由 GPS、多普勒计程仪、光纤陀螺传感器构成的自主导航系统, 并对其航位推算算法做了进一步研究、完善, 以提高其自主导航精度。在该自主导航系统中, 接收到的 GPS 位置信息将被作为 AUV 自主导航中航位推算的初始值使用。本文利用 AUV 湖试结果, 对本算法进行了验证。结果表明: 该算法进一步提高了 AUV 的自主导航精度。

#### 2 航位推算 (Dead reckoning)

由于地球是一个表面形态不规则的球体, 很难用一个简单的几何形状来表示它的确切形状。天文大地测量研究结果表明, 最接近大地体的数学形体是具有微小扁率的旋转椭球体。它以地心为中心, 连接南、北两极的极轴为旋转轴, 这种椭球体称为地球

椭球体.所谓子午线(或经线),就是用通过旋转轴的平面来截割地球椭球体表面得出的一组截线,这些截线是一些彼此相同的椭圆,长轴在赤道,短轴为极轴.这种椭圆又称子午椭圆<sup>[3]</sup>.

对地球子午椭圆建立如图 1 所示坐标系并做辅助线.设 M 是其上的任意一点,这一点的法线与赤道平面所构成的夹角称为大地纬度.

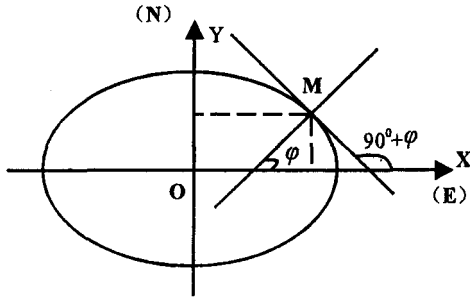


图 1 子午椭圆坐标系

Fig. 1 The meridian circle coordinate system

根据 1971 年第 15 届国际大地测量和地球物理协会决议所采用的数据,平均赤道半径:  $a = 6378137 \pm 2m$ ,平均极半径:  $b = 6356755 \pm 5m$ .

2.1 子午椭圆参数方程

子午椭圆参数方程如下<sup>[3]</sup>:

$$\begin{cases} X = \frac{a \cos \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \\ Y = \frac{a(1 - e^2) \sin \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \\ e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $a$ 、 $b$  分别为地球的赤道半径和极半径,  $\varphi$  为地球纬度,  $e$  为地球第一离心率. 设:  $\varphi \in (-90^\circ, 90^\circ)$ , 其中,  $\varphi < 0^\circ$  为南半球,  $\varphi > 0^\circ$  为北半球.

2.2 地球曲率

微弧计算公式为:

$$ds = \sqrt{x(\alpha)^2 + y(\alpha)^2} d\alpha \quad (2)$$

根据 (1)、(2) 两式,可得子午椭圆上的曲率:

$$\rho_1 = \frac{d\varphi}{ds} = \frac{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{3}{2}}}{a(1 - e^2)} \quad (3)$$

地球的纬线圈是一系列半径不等的圆,本文称作纬线圈.根据圆的曲率公式可知,圆的曲率只跟圆半径有关<sup>[3]</sup>,所以,可得纬线圈的曲率为:

$$\rho_2 = \frac{d\alpha}{ds} = \frac{1}{r} = \frac{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}{a \cos \varphi} \quad (4)$$

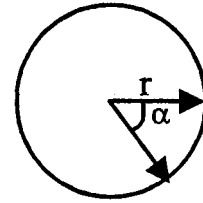


图 2 地球纬线圈

Fig. 2 The latitude circle

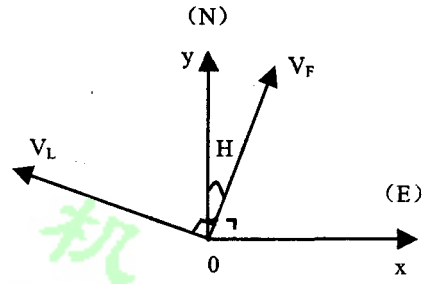


图 3 AUV 航向角 (H)

Fig. 3 The AUV's heading angle(H)

2.3 AUV 在北东坐标系的速度

对于 AUV 载体航行速度在正东方向和正北方向的分量计算如下:

$$\begin{bmatrix} V_E \\ V_N \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin H & -\cos H \\ \cos H & \sin H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_F \\ V_L \end{bmatrix} \quad (5)$$

$V_E$ 、 $V_N$  分别为载体航行速度在正东方向和正北方向的分量;  $V_F$ 、 $V_L$  分别为多普勒计程仪测得载体相对大地的前向速度和左向速度;  $\beta$  为光纤陀螺传感器的安装偏角,以光纤陀螺传感器正方向偏右为正;  $H$  为载体的航向角,顺时针为正;  $k$  为速度校正系数;其中,  $k$ 、 $\beta$  可通过最小二乘辨识出来.

2.4 AUV 载体航行中经度、纬度

$$\begin{cases} J_n = J_0 + \sum_{i=1}^n V_{E, (i-1)} \Delta t \rho_{2, (i-1)} \\ W_n = W_0 + \sum_{i=0}^n V_{N, (i-1)} \Delta t \rho_{1, (i-1)} \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $\Delta t$  为采样周期;  $J_n$ 、 $W_n$  为  $n$  时刻载体所在的经度和纬度;  $J_0$ 、 $W_0$  为载体初始时刻经度和纬度,可由 GPS 接收机得到;  $\rho_{1, (i-1)}$ 、 $\rho_{2, (i-1)}$  分别为  $(i-1)$  时刻子午椭圆和纬线圈的曲率.

3 传感器数据滤波 (Data filtering of sensors)

由于获得的各种传感器的测量数据不可避免地存在噪声污染,所以,在进行航位推算以及参数辨识前必须进行滤波,以提高精度.经过综合考虑,尤其

是 AUV对数据滤波的实时性要求,本文采用了渐消记忆递推最小二乘法进行滤波<sup>[1,2,4]</sup>。以下是渐消记忆递推最小二乘滤波的算法流程:

$$\varphi(N+1) = [-y(N+n) \dots -y(N+1), u(N+n) \dots u(N+1)]^T \quad (7)$$

$$K(N) = \frac{P(N)\varphi(N+1)}{\lambda + \varphi^T(N+1)P(N)\varphi(N+1)} \quad (8)$$

$$P(N+1) = \frac{P(N)}{\lambda} \left[ I - \frac{\varphi(N+1)\varphi^T(N+1)P(N)}{\lambda + \varphi^T(N+1)P(N)\varphi(N+1)} \right] \quad (9)$$

$$e = y(n+N+1) - \varphi^T(N+1)\hat{\theta}(N) \quad (10)$$

$$J(n+N+1) = J(n+N) + e^2 \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} V_E \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k \left[ 1 - \frac{\beta^2}{2} \right] (V_F \sin H - V_L \cos H) + k\beta (V_F \cos H + V_L \sin H) \\ -k\beta (V_F \sin H - V_L \cos H) + k \left[ 1 - \frac{\beta^2}{2} \right] (V_F \cos H + V_L \sin H) \end{bmatrix} \quad (14)$$

设:

$$\begin{cases} a_1 = k \left[ 1 - \frac{\beta^2}{2} \right] \\ a_2 = k\beta \\ u_1 = (V_F \sin H - V_L \cos H) \\ u_2 = (V_F \cos H + V_L \sin H) \end{cases}$$

则:

$$\begin{cases} V_E = a_1 u_1 + a_2 u_2 \\ V_N = -a_2 u_1 + a_1 u_2 \end{cases}$$

从而,由经纬度的推算公式(6)可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta J \\ \Delta W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \Delta t \theta_2 & u_2 \Delta t \theta_2 \\ u_2 \Delta t \theta_1 & -u_1 \Delta t \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

记:

$$y = \phi \theta \quad (16)$$

其中,  $y = \begin{bmatrix} \Delta J \\ \Delta W \end{bmatrix}$ ,  $\phi = \begin{bmatrix} u_1 \Delta t \theta_2 & u_2 \Delta t \theta_2 \\ u_2 \Delta t \theta_1 & -u_1 \Delta t \theta_1 \end{bmatrix}$ ,  $\theta = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$ ,

则:根据最小二乘原理,参数  $\theta$ 的估计值  $\hat{\theta}$ 为:

$$\hat{\theta} = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T y \quad (17)$$

### 5 实验验证 (Experimental verification)

实验步骤如下:

1) 系统初始化;

2) 载入数据:GPS经纬度数据、多普勒计程仪速度数据、光纤陀螺传感器航向数据以及采样周期  $T$ ;

3) 利用渐消记忆递推最小二乘滤波算法,对GPS数据进行滤波并作为真值使用;

$$\hat{\theta}(N+1) = \hat{\theta}(N) + K(N)e(n+N+1) \quad (12)$$

$$y_{\text{filter}}(N+1) = \varphi^T(N+1)\hat{\theta}(N+1) \quad (13)$$

其中,初始值  $\hat{\theta}(0) = 0$ ,  $P(0) = \alpha I$ ,  $\alpha$ 取为  $10^{10}$ ;遗忘因子  $\lambda$ 越小,遗忘速度越快,这里取为 0.94.

### 4 航位推算方程中的参数辨识 (Parameter identification of the equations for dead reckoning)

对于北东坐标系下的 AUV速度公式(5)来说,由于安装偏角  $\beta$ 一般较小,可以做如下近似:  $\sin\beta \approx$

$\beta$ ,  $\cos\beta \approx 1 - \frac{\beta^2}{2}$ ,整理(5)式得:

4) 用最小二乘法辨识安装偏角  $H$ 和速度校正系数  $k$ ;

5) 根据辨识的参数,修正自主导航航位推算公式,并进行自主导航航位推算以及导航精度分析;

6) 精度分析.

根据 AUV湖试的有关数据,利用其中两次的试验结果对本算法进行了验证,取得了满意的结果.

表 1 应用本算法前后导航精度对比

Table 1 Comparison of the navigation precision before and after using this algorithm

	性能评价指标	应用算法前	应用算法后
第一次	目标点绝对误差 (m)	247.1494	11.5073
	目标点相对误差	0.0489	0.0023
第二次	目标点绝对误差 (m)	126.3250	10.8976
	目标点相对误差	0.0438	0.0039

从实验结果对比表以及图 4~图 7可以看出, AUV在自主导航过程中,其导航误差是不断积累的. 在应用本算法前,自主导航的航位误差比较大,尤其是在目标点(最远距离的作业点)的误差,无法满足 AUV的任务要求;应用本算法后,导航误差大大减小,航位推算的精度进一步提高,满足了 AUV远离长时间航行的导航精度需求.

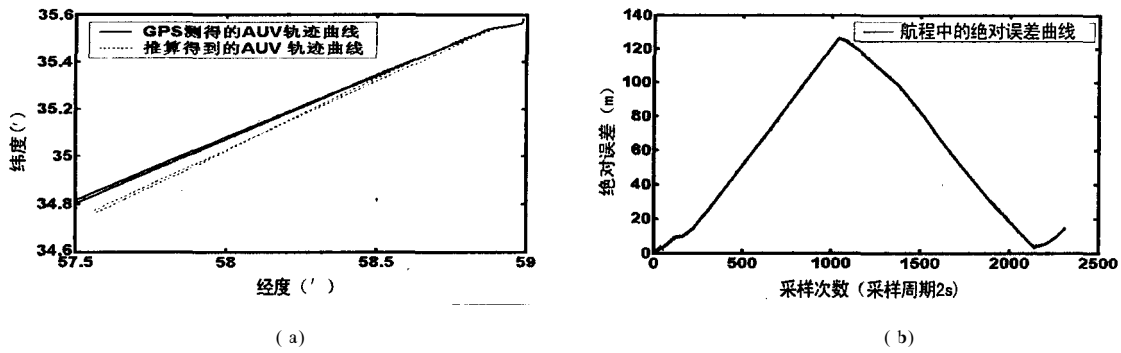


图 4 算法应用前, AUV 轨迹曲线对比图以及 AUV 航程中的绝对误差曲线图  
Fig. 4 Comparison of AUV's track curves, the absolute-error curves of the voyage before applying the method

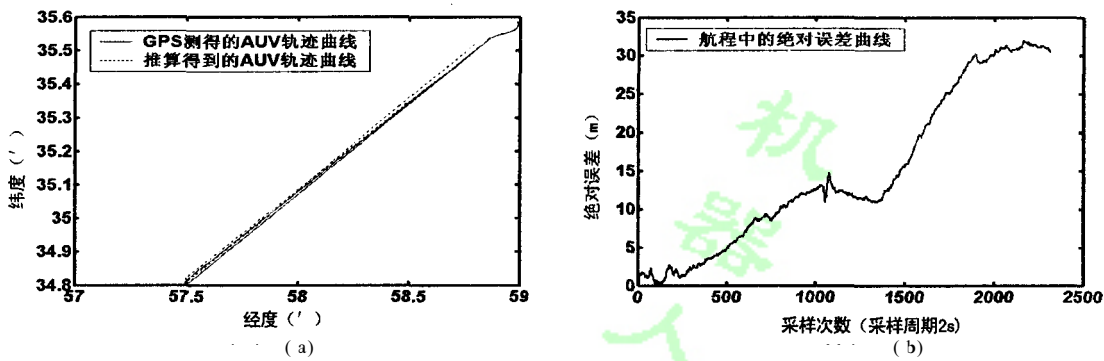


图 5 算法应用后, AUV 轨迹曲线对比图以及 AUV 航程中的绝对误差曲线图  
Fig. 5 Comparison of AUV's track curves, the absolute-error curves of the voyage after applying the method

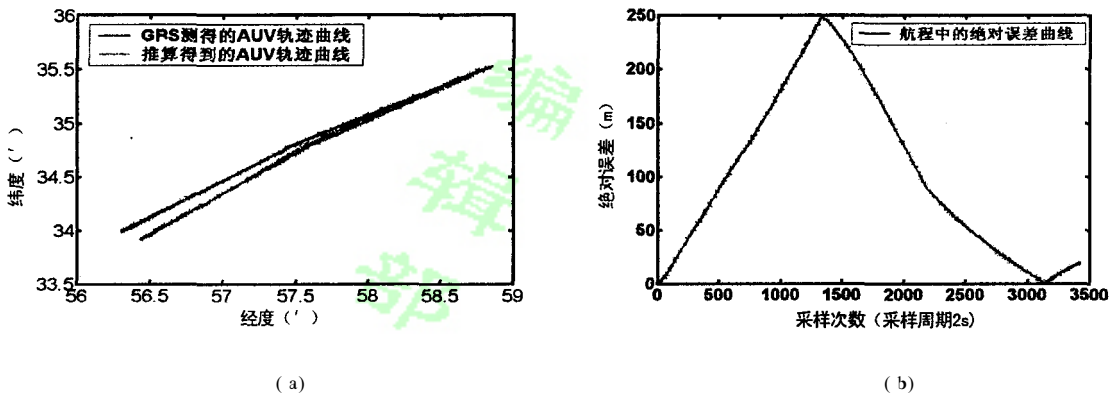


图 6 算法应用前, AUV 轨迹曲线对比图以及 AUV 航程中的绝对误差曲线图  
Fig. 6 Comparison of AUV's track curves, the absolute-error curves of the voyage before applying the method

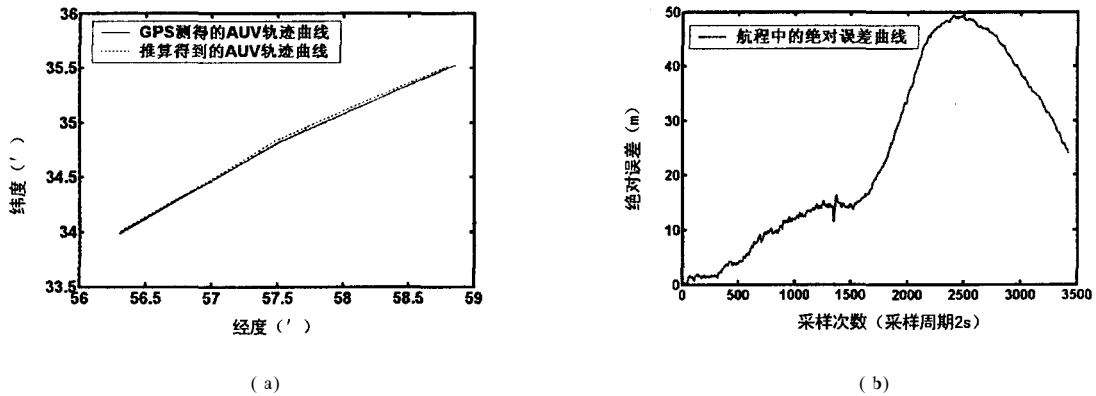


图 7 算法应用后, AUV 轨迹曲线对比图以及 AUV 航程中的绝对误差曲线图  
Fig. 7 Comparison of AUV's track curves, the absolute-error curves of the voyage after applying the method

## 6 结论 (Conclusion)

本文首先利用渐消记忆递推最小二乘法对 GPS 给出的经纬度数据进行滤波,然后,辨识出 AUV 载体上多普勒计程仪的速度校正系数以及光纤陀螺传感器的安装偏角,由此确定以光纤陀螺、多普勒计程仪组成的自主导航系统中航位推算方程的有关系数,进行自主导航航位推算,航行途中, AUV 可以浮出水面接收 GPS 信息作为航位推算的初始值校正自主导航方程中的有关参量.此外,考虑到 AUV 远距离航行的需要,还采用了地球椭球模型,进一步提高了导航精度,在长时间、远距离航行时,其效果更为显著.

本文利用 AUV 湖试结果对该自主导航航位推算算法进行了验证.结果表明, AUV 的自主导航精度得到大大提高,可以用于修正原来的自主导航算法,以满足高精度远距离导航的要求.

### 参考文献 (References)

[1] 李言俊,张科. 系统辨识理论及应用[M]. 北京:国防工业出版社

社,2003. 50 - 90,112 - 116.

[2] 邓自立. 自校正滤波理论及其应用:现代时间序列分析方法[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2003. 32 - 69.

[3] 陈雄南. 高等数学(测绘专业用)[M]. 上海:测绘出版社,1978. 153 - 167.

[4] 龚耀寰. 自适应滤波(第二版)——时域自适应滤波和智能天线[M]. 北京:电子工业出版社,2003. 89 - 108.

[5] 李俊,等. 基于多普勒速度声纳的水下航行器导航方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2004,32(1): 73 - 75.

[6] 黄晓瑞,崔平远,崔祐涛. 基于自适应信息融合的导航系统构成与算法研究[J]. 电子学报,2002,30(7):1061 - 1064.

[7] NEBOT E M. Sensors Used for Autonomous Navigation[R]. Australia: Australian Centre for Field Robotics, The University of Sydney, NSW 2006. [http://www.acfr.usyd.edu.au/teaching/3rd-year/mech3700-Mx2/material/sensors/nebot\\_sensors.pdf](http://www.acfr.usyd.edu.au/teaching/3rd-year/mech3700-Mx2/material/sensors/nebot_sensors.pdf).

### 作者简介:

冯子龙(1977-),男,硕士研究生,研究领域:水下机器人导航.

刘健(1962-),男,硕士,研究领域:自动控制.

刘开周(1976-),男,博士,研究领域:机器人控制,计算机仿真和虚拟现实等.

(上接第 151 页)

(2) 改善垂直面内的机动性.靠改变自重的方式下潜,动态响应速度很慢;靠改变胸鳍迎角下潜,只能在一定行进速度下才能实现,可以考虑将胸鳍更换为两个垂直推进的螺旋桨推进器,实现快速、垂直下潜.

(3) 配置高性能的任务设备,如:高清晰低照度的广角 CCD、侧扫声纳、机器臂、机器人手等.

(4) 提高下潜深度.目标深度定为 100m,水下遗址大部分在这个深度范围以内.

(5) 优化局部自主能力.这需要升级相应的传感器并改进算法.

### 参考文献 (References)

[1] 张寅生. 水下考古与水下考古探测技术[J]. 东南文化,1996,114(4): 29 - 33.

[2] 蒋新松,封锡盛,王棣棠. 水下机器人[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,2000. 3 - 34.

[3] 封锡盛. 从有缆遥控水下机器人到自治水下机器人[J]. 中国工程科学,2000,2(12): 29 - 33.

[4] 桑恩方,庞永杰,卞红雨. 水下机器人技术[J]. 机器人技术与应用,2003,(3): 8 - 13.

[5] 梁建宏,王田苗,魏宏兴,等. 水下仿生机器鱼的研究进展 I——鱼类推进机理[J]. 机器人,2002,24(2):107 - 111.

[6] 吴春明,张威. 海洋考古学:西方兴起与学术东渐[J]. 中国海洋大学学报,2003,59(3): 39 - 45.

[7] 黄俊峰,邢志伟,李一平. 基于超短基线的缆控水下机器人动力定位[J]. 控制工程,2002,9(6): 75 - 78.

[8] 燕奎臣,李一平,袁学庆. 远程自治水下机器人研究[J]. 机器人,2002,24(4): 209 - 303.

[9] Triantafyllou M S, Triantafyllou G S, Yue D K P. Hydrodynamics of fishlike swimming[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2000, 32: 33 - 53.

[10] "Fish-like swimming[EB/OL]."  
[http://www.drapeer.com/tuna\\_web/vcuuv.html](http://www.drapeer.com/tuna_web/vcuuv.html).

### 作者简介:

王松(1979-),男,博士生,研究领域:微小型机器人技术.

王田苗(1960-),男,教授,研究领域:基于传感器的自主机器人控制、医疗外科机器人、人机交互网络遥操作等.

梁建宏(1977-),男,博士生,研究领域:微小型机器人技术.