

DOI: 10.3724/SP.J.1218.2010.00726

## 两关节仿生水下航行器 SPC-III 的推进与机动性

梁建宏<sup>1</sup>, 郑卫丰<sup>1</sup>, 文力<sup>1</sup>, 王田苗<sup>1</sup>, 刘永军<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学机器人研究所, 北京 100191; 2. 南京国际关系学院, 江苏 南京 210039)

**摘要:** 为评估尾鳍推进机构的实用性, 以 SPC-III 机器鱼作为研究平台, 在同等排水量下分别使用尾鳍推进器和螺旋桨推进器, 比较两者的功率和机动能力. 在海试条件下, 对尾鳍推进器和螺旋桨推进器的功率及机动性进行了测试, 表明前者的转弯半径约为后者的 2/5, 在 2.2 kn 速度下, 前者的功率比后者低约 7%. SPC-III 仿生水下航行器携带多参数水质探测仪在太湖完成了航程为 49 km 的水质探测实验, 得到了太湖水域的蓝绿藻浓度分布数据.

**关键词:** 仿生机器人; 水下航行器; 仿生推进

中图分类号: TH39

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2010)-06-0726-06

### Propulsive and Maneuvering Performances of Two-Joint Biorobotic Autonomous Underwater Vehicle SPC-III

LIANG Jianhong<sup>1</sup>, ZHENG Weifeng<sup>1</sup>, WEN Li<sup>1</sup>, WANG Tianmiao<sup>1</sup>, LIU Yongjun<sup>2</sup>

(1. Robotics Institute, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Nanjing University of International Relations, Nanjing 210039, China)

**Abstract:** In order to evaluate the practicability of the caudal fin thruster, SPC-III biorobotic autonomous underwater vehicle (AUV) is taken as the research platform, the power and mobility of a caudal fin thruster and a screw propeller are compared under the condition of the same tonnage. The sea trial results about the power and mobility of the caudal fin thruster and the screw propeller show that the turning radius of the former is about 2/5 of that of the latter and the power consumption of the former is less about 7% than that of the latter at the speed of 2.2 kn. Using caudal fin propulsion and carrying water quality multiprobes, SPC-III has successfully performed a 49 km probe experiment and collected concentration distributing data of blue-green algae in the water of Taihu Lake.

**Keywords:** biorobotics; underwater vehicle; bionic propulsion

## 1 引言 (Introduction)

二十多年来, 人们对海豚和金枪鱼这类具有高超游泳技能的海洋动物进行了深入的研究. 以其主要的推进装置尾鳍作为研究对象, 研究者已经初步掌握了身体—尾鳍运动方式和水动力学原理<sup>[1-2]</sup>. 通过建模、仿真计算以及水池内的模型实验甚至获得了尾鳍最佳拍动的运动参数范围<sup>[3-6]</sup>. 得益于这些研究成果, 面向任务的仿生水下航行器原型样机开始出现, 低速机动性、低噪声以及高效率成为热点问题<sup>[7]</sup>. Anderson 等人研制了涡流控制无人水下航行器 VCUUV, VCUUV 长 2.4 m, 遵循黄鳍金枪鱼的运动, 采用液压驱动的 4 关节尾鳍装置, 速度达到 1.2 m/s, 转向速率达到 75°/s<sup>[8-9]</sup>. Nakashima 等人研制了长 1.75 m 的两关节机器海豚, 该水下机器人的

推进速度达到 1.2 m/s, 效率达到 0.35<sup>[10]</sup>.

北京航空航天大学研制的 SPC-III 仿生水下航行器是一种面向探测任务的原型样机. 我们希望通过 SPC-III 实现对尾鳍巡游机理的认识, 发展一种既能改善传统推进 UUV 的机动性和噪声, 又具有可接受的航速、推进效率或是续航力的仿生推进装置. SPC 系列仿生水下航行器的研究工作始于 2001 年. SPC-I 是一个用于研究航行稳定性以及艏摇对尾鳍推进影响的原型样机<sup>[11]</sup>. SPC-II 是一个研究盘旋和转向机动性的原型样机. 它获得了 30°/s 的转向速率, 转弯直径约为 1 倍体长. 它在 2004 年被用于中国国家历史博物馆水下考古队在福建省东山岛辅助水下考古工作<sup>[12-13]</sup>. SPC-III 具有和传统 UUV 一样的鱼雷似的外形, 它的两关节尾鳍推进器可方便

地更换为螺旋桨推进器，从而可以获取各种性能和螺旋桨比较的初步结果，评估仿生水下航行器用于探测任务的可行性。

## 2 实验系统描述 (Description of the experimental system)

### 2.1 SPC-III 系统描述

SPC-III 是按照任务需要设计的航行器，因此要求壳体能够承受水的压力。前段和中段壳体都是由碳纤维和铝合金骨架构建的。为安装尾鳍推进器，尾段的形状较为复杂，因此采用工程塑料在模具中成型。SPC 系列仿生航行器有两个重要的特点：一是尾鳍推进器没有采用柔性的结构，而是将体积重量都很小的驱动连杆机构暴露在水中；二是由两个直流伺服电机驱动尾鳍，直流伺服电机较之其他方式具有较高的机电转换效率。

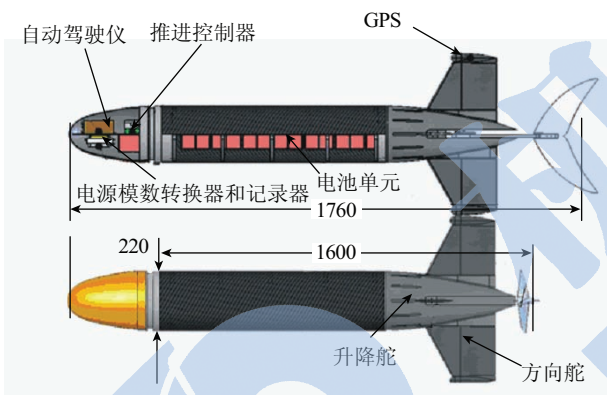


图 1 SPC-III 仿生水下航行器与螺旋桨推进的无人水下航行器

Fig.1 SPC-III biorobotic AUV and an AUV with a screw propeller

如图 1 所示，SPC-III 的前段是设备和载荷舱。安装在最前面的是用于控制小型无人机的 IFLY40

自动驾驶仪，它能够提供姿态、航向角、位置和高度信息，并具有 5 个 PID 控制器，在这里唯一的区别是将气压传感器替换成了水压传感器，提供 0 ~ 50 m 的深度控制。自动驾驶仪的下面是功率 AD 转换和记录仪，后面是尾鳍推进器的运动控制器。中段是动力舱，由 28 块 84 W·h 的锂聚合物电池构成动力单元，能够为 SPC-III 提供持久的续航力。背鳍顶端是自动驾驶仪的 GPS 天线。

### 2.2 尾鳍推进器及其控制律

如图 2 所示，产生推力的尾鳍被安装在驱动连杆总成的末端。尾鳍是由 1 mm 厚的碳纤维制成，模仿了金枪鱼尾鳍的外形，但展弦比较小，尺寸数据见表 1。连杆 1 和连杆 2 分别由两个 Maxon RE40 24 V 电机通过减速比为 30 的减速器驱动。设尾鳍的

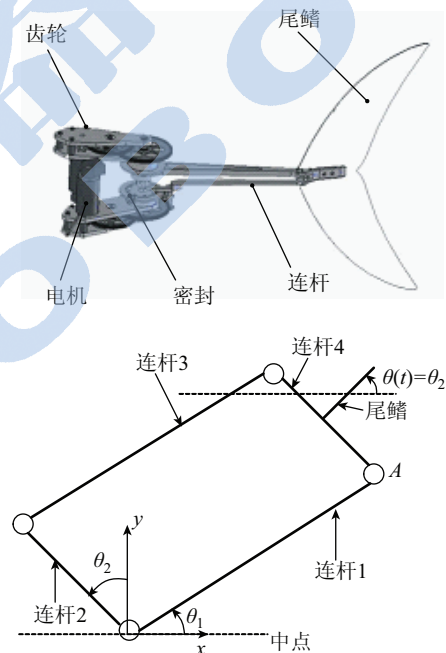


图 2 尾鳍推进器结构原理图

Fig.2 The principle sketch of caudal fin thruster

表 1 尾鳍推进器与螺旋桨推进器对比数据

Tab.1 Comparison between caudal fin thruster and screw propeller

尾鳍推进器		螺旋桨推进器	
尾鳍面积 $S/\text{mm}^2$	25287	直径 $D/\text{mm}$	240
最大弦长 $c_0/\text{mm}$	120	叶数 $Z$	3
平均弦长 $c/\text{mm}$	70	盘面比 $A_E/A_0$	0.36
前缘后掠角 $l(^{\circ})$	47	螺距比 $(P/D)_{0.7R}$	0.837
翼型	1 mm 平板	翼型	NACA66 mod $a = 0.8$
连杆 1、3 长度/mm	280	毂径比 $d_h/D$	0.18
连杆 2、4 长度/mm	28	旋向	右旋
驱动电机	RE40 (150 W) $\times 2$	驱动电机	RE40 (150 W) $\times 1$
减速器	$i = 30$ (2 级直齿轮)	减速器	$i = 5$ (1 级行星齿轮)

拍动幅度为  $A$ , 相对来流的攻角为  $\alpha$ ,  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  分别是两个电机经过减速器输出的角度, 则有如下关系:

$$\begin{cases} A = L \sin \theta_1 \\ \alpha = \theta_2 \end{cases} \quad (1)$$

在巡游状态, 尾鳍工作的有效性受到以下几个参数的影响<sup>[5]</sup>: (1) 无量纲摆幅, 定义为  $H = A_0/c_0$ ,  $A_0$  是摆动的峰值; (2) 尾鳍攻角幅值  $\alpha_0$ ; (3) 前两者的相位差  $\Phi$ ; (4) 斯特劳哈尔数 (Strouhal number), 定义为  $St = fA_0/V$ ,  $V$  是来流的速度. 对于海豚及金枪鱼等主要采用尾鳍推进的海洋动物, 其尾鳍运动规律可表述为

$$\begin{cases} A = \frac{1}{2} A_0 \cos(2\pi t) \\ \alpha = \alpha_0 \cos(2\pi t - \Phi) \end{cases} \quad (2)$$

可见, 只要调整电机输出  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  的运动规律, 就可以实现对前 3 个因素的精确调节. 本文利用一台两轴运动控制器作为尾鳍推进器的控制系统, 来产生上述运动规律. 关于以上 4 个参数的最佳范围, 前人已经得到了初步的结论<sup>[3-5,14]</sup>, 在后面涉及的实验中, 将给出自推进的 SPC-III 在开阔水域下获得的部分结果.

在尾段锥形的狭窄空间里安装两台驱动单元是非常困难的, 这里定制了一种非常薄的直齿轮减速器, 并且将电机—减速器—密封总成交错放置, 来完成尾鳍推进器的装配, 因此不能再增加转速扭矩传感器.

### 2.3 螺旋桨对比 UUV

搭建用于对比的 UUV 实验平台, 实际上是直接将 SPC-III 的尾鳍推进器替换为螺旋桨推进器, 动力单元、运动控制器和放大器 etc 是完全一样的, 这样减少了存在差异的因素. 螺旋桨的选择和制作得到了中国船舶研究中心的帮助, 该螺旋桨在 5 kn 时的敞水效率  $\eta_0$  预计为 0.67<sup>[15]</sup>. 螺旋桨推进器的结构如图 3 所示, 它与尾鳍推进器的参数比较列于表 1.

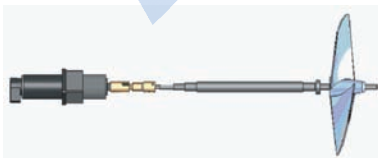


图 3 螺旋桨推进器结构图

Fig.3 Structure diagram of the screw propeller

## 3 推进及机动性实验 (Test of propulsive and maneuvering performance)

### 3.1 测量系统

整个 SPC-III 的测试系统如图 4 所示, IFLY40

自动驾驶仪为它提供了完善的遥测功能. 本文主要关注推进器的功率, 航行器的航速、机动性和航行稳定性. 所有采集的数据是通过自动驾驶仪加入协议帧后发给地面站软件的, 上传的速率在 1 ~ 10 帧/秒内可调整.

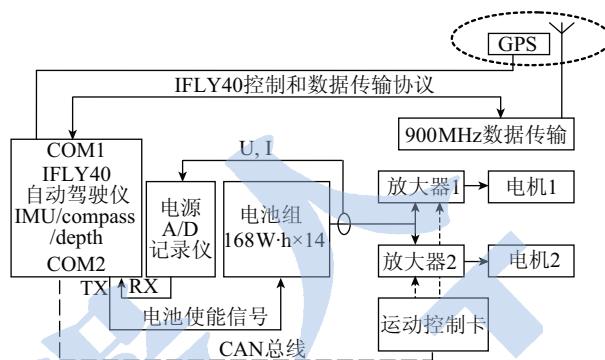


图 4 SPC-III 仿生水下航行器电气系统

Fig.4 Electrical system of the SPC-III biorobotic AUV

- 航速测量. 由于 IFLY40 自动驾驶仪具有 AUV 和 RPV 等多种导航方式, 为航行器长时间保持航向或航线进行测试提供了便利, 因此, 本文直接将自动驾驶仪发回来的经度纬度坐标作为计算距离和速度的原始数据. 该 GPS 提供的定位精度达到 2 m (CEP 误差), 如果取足够长的距离间隔进行计算, 则可获得较准确的平均速度. 本文中, 取 200 s 的数据进行距离和速度计算.

- 功率测量. 功率的测量采用了一台具有 8 通道 16 位 A/D 的嵌入式计算机. 采样频率为 100 Hz, 每 1 s 对功率进行求和计算, 所得功率通过自动驾驶仪发送到地面站 (GCS), 地面站对数据帧进行记录. 在航速和功率测量模式下, 自动驾驶仪的上传速率为 1 帧/秒, 和航速测量一样, 功率测量也对应地取 200 s 的数据求平均值. 电流和电压测量的节点设在电池向放大器供电的回路上, 因此测到的是推进器消耗的全部电功率.

- 转向速率测量. 在机动性测量模式下, 自动驾驶仪的上传速率加快到 10 帧/秒. IFLY40 采用了数据融合算法将陀螺和电子罗盘的输出合成为一个不易受干扰和产生漂移的航向角.

### 3.2 推进性能比较

2006 年 10 月 9 日 ~ 13 日, 在位于渤海西海岸的秦皇岛市海岸进行了 SPC-III 及其螺旋桨对比实验, 如图 5 所示. 实验选在每天退潮后平静的近岸海域进行. 首先对推进器的静态功率和无负载功率进行了测量. 结果显示在尾鳍和螺旋桨推进器静止时, 分别有 7 W 和 3.5 W 的功耗, 这分别对应了 2 台和 1 台放大器的静态功耗. 无负载功率指去掉尾鳍和螺



旋桨，驱动总成运动的功耗，包含了全部的传递损失。在这个环节，由于机械结构更为复杂的原因，尾鳍推进器的功耗要大于螺旋桨推进器的功耗，前者在 2.5 Hz 时达到了 25 W，后者在 10 r/s 时为 18 W。



图 5 SPC-III 仿生水下航行器(右)与无人水下航行器(左)对比  
Fig.5 Comparison of SPC-III biorobotic AUV (the right one) and an AUV (the left one)

水中测试，首先调整航行器的姿态达到水平，为保证 GPS 获得稳定的信号，以及无线数据收发机工作在良好的状态，调整航行器吃水深度使得 GPS 高出水面 0.2 m。为消除控制系统造成的影响，没有启动自动驾驶仪的航向控制功能，而是通过手动调节尾鳍拍动的中间位置，或者方向舵的偏离角使航行器保持直线轨迹，在使用尾鳍推进器时，方向舵是不可用的。

功率和航速的测试是连续进行的，当通过地面站软件 GCS300 向自动驾驶仪设置新的频率、转速和拍动参数后，细微调整保持航行器的直线运动，并且将这个稳定的状态保持几分钟，记录当时的 GPS 时间，后期数据处理时根据这个 GPS 时间寻找有关的测量数据。最终测试结果如图 6 ~ 8 所示。在 2.5 Hz,  $H = 1.5$  时，尾鳍推进器获得最大速度 1.36 m/s，此时推进器的功率为 161 W；螺旋桨推进器在 10 r/s 时获得最大速度 1.4 m/s，此时螺旋桨推进器的功率为 165 W。当试图提高拍动频率或转速以提高航速时，航行器的俯仰变得不稳定，也可能因为水面的阻力大于水下的阻力，航行器容易俯仰震荡，潜入水中，使得 GPS 不能正常工作。

在尾鳍拍动的运动律调整中，原则是产生较大的推力和速度，以便与螺旋桨推进器做比较。由于碳纤维尾鳍产生形变，实际使用的运动律与早先工作得到的理想值有一些差异，尾鳍的形变可理解为攻角幅度的增大和相位的滞后，最终实验采用  $\alpha = 10^\circ$ ,  $\Phi = 45^\circ$ ，这时获得较大的推进速度。实验中测试了  $H = 0.75$ ,  $H = 1$ ,  $H = 1.5$  三种情况，发现  $H = 1.5$  在同等频率下能输出较大功率，而相同速度下消耗的功率又相对较小。特别是当  $H = 1.5$ ,  $f =$

2 Hz 时，尾鳍推进器获得 1.1 m/s 的航速，比对应航速下螺旋桨消耗的有效功率小约 7% (图 8)，其中有效功率指总功率减去空载功率后的功率。

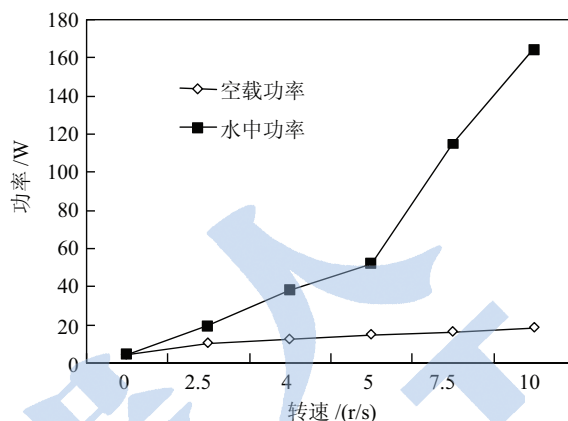


图 6 螺旋桨推进器功耗—电机转速曲线  
Fig.6 The power of screw propeller vs. the motor speed

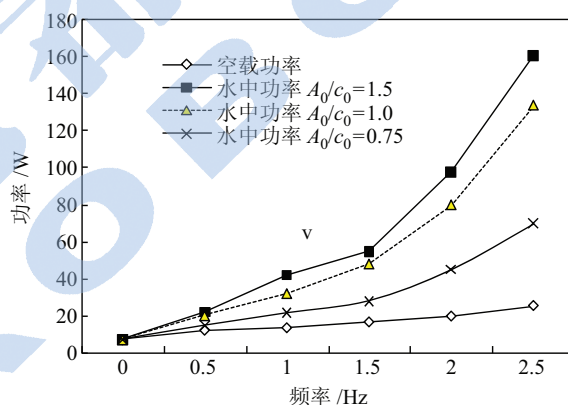


图 7 尾鳍推进器功率—频率曲线  
Fig.7 Power and frequency of the caudal fin propeller

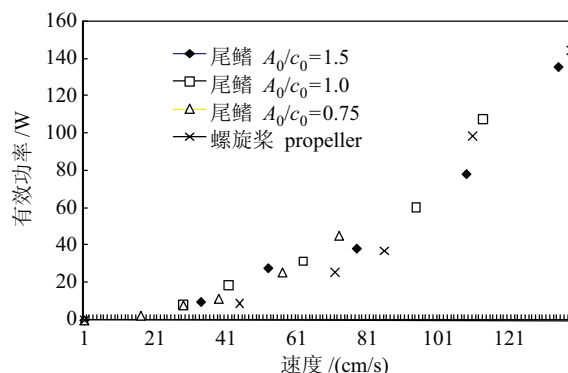


图 8 尾鳍推进器有效功率—机器人鱼速度曲线  
Fig.8 The effective power of caudal fin propeller vs. the speed of robot fish

### 3.3 苏比萨机动性能测试结果

便携式 UUV 可能的任务包括港口、海岸的探测，水雷识别和销毁，这些任务往往要求 UUV 近距离靠近目标，同时又要避免碰撞，这时低速机动性

尤为重要。例如,在自主航行状态下 AUV 陷入狭小的空间,这时需要 AUV 原地回转以回到开阔水域,但原地旋转这种 ROV 常用的机动对于以巡航为优势的 AUV 是苛刻的要求。

VCUUV 的转弯半径为 2 倍体长 (BL),转弯角速率达到  $75^\circ/\text{s}$ <sup>[8]</sup>。由于具有柔性的尾段壳体及液压驱动的四关节尾鳍,因此其转弯机动性很好。SPC-III 虽然是完全的刚性壳体,并且只有 2 个关节,但由于独特的尾部结构,尾鳍可实现  $0 \sim 90^\circ$  的偏转角,在偏转角为  $90^\circ$  时,可用于紧急制动。

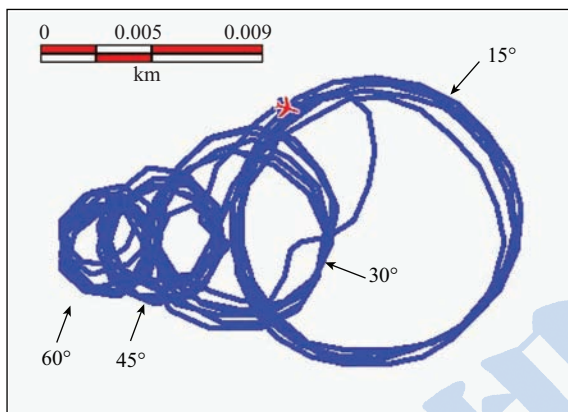


图 9 SPC-III 采用不同尾鳍偏转时的游动轨迹 (速度大约为 1.1 m/s)

Fig.9 The trajectory of SPC-III AUV performing different caudal fin deflection at about 1.1 m/s

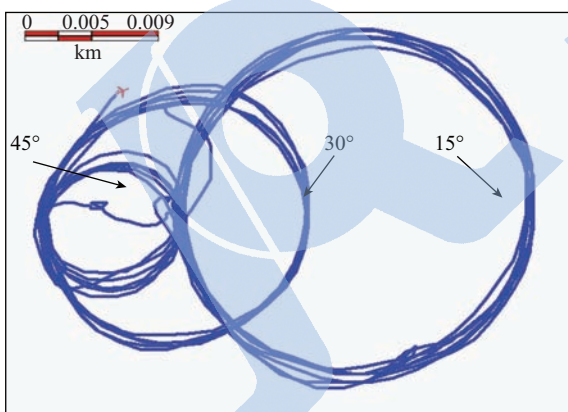


图 10 螺旋桨 UUV 采用不同方向舵偏转时的游动轨迹 (速度大约为 1.1 m/s)

Fig.10 The trajectory of the UUV with screw propeller performing different rudder deflection at about 1.1 m/s

图 9、10 给出了 SPC-III 及螺旋桨对比 UUV 进行机动性测试时的圆形轨迹。该轨迹是由自动记录仪记录的 GPS 坐标,利用 GCS300 地面站软件绘制,注意这时地图的比例尺刻度为 5 m。SPC-III 采用的拍动频率是 2 Hz,螺旋桨的转速是 7.5 r/s,对应的直线速度在 1.1 m/s 左右,而在转弯中,速度会随着转弯半径变小而显著减小。在  $45^\circ$  偏转角下,尾鳍推

进器获得 2BL 的转弯直径,而使用方向舵的螺旋桨推进器获得 5BL 的转弯直径。尾鳍推进器的最小转弯直径在偏转角为  $60^\circ$  时获得,为 1.5BL。图 11 是转弯速率测量结果,使用了两种数据,一种是根据航行器完成圆形航线的时间计算获得,另一种是由罗盘数据获得,两种方法取得的数据基本一致。在同等偏转角下,螺旋桨的转弯角速率大约是尾鳍的 1/2。

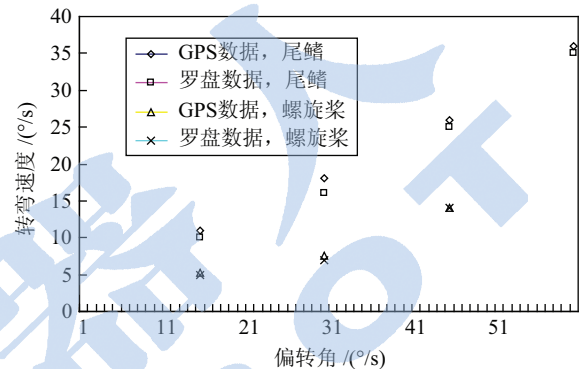


图 11 SPC-III 和对比 UUV 的偏航速率与尾鳍 (方向舵) 偏转角的关系 (速度大约为 1.1 m/s)

Fig.11 Relationship between turning rate and deflection angle of SPC-III and the comparison UUV, at about 1.1 m/s

#### 4 蓝绿藻探测实验 (Exploration of blue-green algae)

通过蓝绿藻探测实验可以检验 SPC-III 的推进和机动性能。太湖是无锡市主要的饮用水水源。2007 年夏天,太湖蓝绿藻大规模爆发,成为困扰当地居民和政府的首要环境问题。2007 年 11 月,SPC-III 搭载多参数水质检测仪 (HACH D5X),在太湖完成了约 49 km 的水质探测巡游 (图 12),获取了蓝绿藻浓度分布等水质数据,部分探测结果如表 2 所示。

表 2 SPC-III 搭载哈希 D5X 在太湖所获得的数据  
Tab.2 Data brought back by SPC-III carrying HACH D5X in Taihu Lake

太湖水质数据	
平均 Ph 值	8.52
最高的 Ph 值	9.51
蓝绿藻浓度 (湖中央)	3823 cell/ml
平均污染浓度 (部分湖岸)	288112 cell/ml
获得的最大浓度	868120 cell/ml

作为一种便携式 UUV,SPC-III 的便利性在太湖实验中得到体现。图 13 所示为 SPC-III 在太湖的工作环境。它可以由 2 个人轻松地投放或者打捞,仅仅依靠手,不需要专门的船只和装置。靠近湖岸的树枝、水草通常会成为小型螺旋桨的巨大威胁,



但是仅依靠摆动推进的尾鳍推进器在通过这样的区域时十分安全, 因此 SPC-III 可以在十分靠近岸边、水生植物丰富的水域巡游, 这些地方恰恰是蓝绿藻十分活跃的地点. SPC-III 的机动性优势也得到了发挥, 在设定的航线上, 常常会出现渔网或者航标, 这时需要人为干预改变航行器的航向, 由于 SPC-III 具有较大的转向角速率, 不必要很早就对障碍物进行预警, 只需要十分接近时采取措施. 在距离湖岸只有几米的地方巡游时, 会遇到凸出的水生灌木, SPC-III 只需要将速度降下来, 利用很小的回转半径绕开, 这对于只有一个推进器的螺旋桨 UUV 是非常困难的. 仅对电池进行了一次充电, SPC-III 完成了连续 3 天、总路程 49 km 的工作, 尾鳍推进器没有出现一次故障, 初步证实了这种推进器的可靠性.



图 12 SPC-III 在太湖的巡游轨迹用蓝色表示, 重度污染区域以红色表示

Fig.12 Cruising trajectory of SPC-III in Taihu Lake shown in blue, and areas under heavy pollution indicated in red



图 13 SPC-III 在太湖的工作环境

Fig.13 Working environment of SPC-III on Taihu Lake

## 5 讨论 (Discussion)

与高速巡游的海豚、金枪鱼相比, 现有的仿生水下航行器仍然存在巨大的差距. 但是与传统的单螺旋桨推进器 AUV 比较, SPC-III 已经取得了很大

的进步. 它只占用不大的排水量, 就实现了一元矢量推力, 从而使 AUV 的低速机动性得到了显著提高, 并且尾鳍推进器的功耗并不令人失望. 因此, 采用伺服电机驱动两关节的尾鳍推进器, 不失为现有技术下一种可行的方案. 但是, 这种方案也有先天的不足. 由于伺服电机工作在往复摆动情况, 在提供同样平均功率的前提下, 伺服电机的峰值功率要比匀速状态下的功率高 40%, 因此要求伺服电机和放大器具有更高的功率冗余, 这相当于降低了推进器的功率密度. 这也限制了 SPC-III 提高航速. 同样还是因为工作在往复摆动模式下, 伺服电机、减速器并不是一直在最佳效率点工作, 可以预见尾鳍推进器的机电转换效率和传递效率要低于匀速转动的螺旋桨推进器.

## 6 结论 (Conclusion)

对于单螺旋桨推进器的便携式 AUV, 本文给出了一种两关节尾鳍推进器的替代设计方案. 使用这种尾鳍推进器的 SPC-III 仿生水下航行器排水量 47 kg, 长度 1.75 m, 尾鳍推进器仅占排水量的 7%. 在海面上进行了自航对比实验. 当  $H=1.5$ ,  $f=2\text{ Hz}$  时, 尾鳍推进器获得 1.1 m/s 的航速, 比对应航速下螺旋桨消耗的有效功率小约 7%. 最大速度达到 1.36 m/s, 最小转弯半径约为 0.75 倍体长, 而对比螺旋桨 UUV 的最小转弯半径约为 2.5 倍体长. 配置 168 W·h×14 动力单元时, 在 2 km 左右航速下的续航时间达到 20 h.

## 参考文献 (References)

- [1] Fish F E, Rohr J J. Review of dolphin hydrodynamics and swimming performance[R]. USA: United States Navy, 1999.
- [2] Wu Y T, Brokaw C J, Brennan C. Swimming and flying in nature[M]. New York, USA: Plenum Press, 1975: 53-55.
- [3] Anderson J M, Streitlien K, Barrett D S, et al. Oscillating foils of high propulsive efficiency[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 360: 41-72.
- [4] Barrett D S, Triantafyllou M S, Yue D K P, et al. Drag reduction in fish-like locomotion[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1999, 392: 183-212.
- [5] Triantafyllou M S, Triantafyllou G S, Yue D K P. Hydrodynamics of fishlike swimming[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2000, 32: 33-53.
- [6] Cheng J Y, Zhuang L X, Tong B G. Analysis of swimming three-dimensional waving plates[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991, 232: 341-355.
- [7] Bandyopadhyay P R. Trends in biorobotic autonomous undersea vehicles[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30(1): 109-139.
- [8] Anderson J M, Chhabra N K. Maneuvering and stability performance of a robotic tuna[J]. Integrative and Comparative Biology, 2002, 42(1): 118-126.

的鲁棒稳定性. 从理论上证明了鲁棒仿生学习控制器的稳定性. 通过对两轮机器人的仿真研究, 证实本文提出的鲁棒仿生学习方案不需要耗费太多的时间去进行试错学习, 大大提高了控制器的收敛速度; 并且由于鲁棒项的存在, 即使存在外部或内部干扰, 机器人也能达到期望的目标, 表现出良好的鲁棒性. 由于本文提出的鲁棒仿生学习控制器是一个不基于模型的控制, 因此从这个意义上来说, 它可以应用于任何一类指定的系统.

### 参考文献 (References)

- [1] Unsal C, Kachroo P, Bay J S. Multiple stochastic learning automata for vehicle path control in an automated highway system[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Part A*, 1999, 29(1): 120-128.
- [2] Chang H S, Fu M C, Hu J Q, et al. Recursive learning automata approach to Markov decision processes[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(7): 1349-1355.
- [3] Sutton R S, Barto A G. Reinforcement learning[M]. Cambridge, USA: MIT, 1998.
- [4] Kondo T, Ito K. A reinforcement learning with evolutionary state recruitment strategy for autonomous mobile robots control[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2004, 46(2): 111-124.
- [5] 蔡建美, 阮晓钢, 郇园园. 随机模糊控制策略及其在机器人控制中的应用[J]. *电机与控制学报*, 2009, 13(5): 754-761. Cai Jianxian, Ruan Xiaogang, Gao Yuanyuan. Stochastic fuzzy control strategy and application to robot control[J]. *Electric Machines and Control*, 2009, 13(5): 754-761.
- [6] Ruan X G, Cai J X. Stochastic fuzzy controller based on OCPFA and applied on two-wheeled self-balanced robot[M]//*Advances in Intelligent and Soft Computing*, vol.62. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2009: 141-151.
- [7] Skinner B F. The behavior of organisms[M]. New York, USA: Appleton-Century-Crofts, 1938.
- [8] Kuljaca O, Lewis F L. Adaptive critic design using non-linear network structures[J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2003, 17(6): 431-445.
- [9] Lin C K. Adaptive critic autopilot design of bank-to-turn missiles using fuzzy basis function networks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Part B*, 2005, 35(2): 197-207.
- [10] Lin C K. Robust adaptive critic control of nonlinear systems using fuzzy basis function networks: An LMI approach[J]. *Information Sciences*, 2007, 177(22): 4934-4946.
- 作者简介:**  
蔡建美 (1978-), 女, 博士生, 讲师. 研究领域: 机器人智能控制, 机器学习等.  
阮晓钢 (1958-), 男, 博士后, 教授. 研究领域: 机器人, 自动控制与人工智能等.
- 
- (上接第 731 页)
- [9] Anderson J M, Kerrebrock P A. The vorticity control unmanned undersea vehicle (VCUUV) – An autonomous vehicle employing fish swimming propulsion and maneuvering[C]//10th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology. 1997: 189-195.
- [10] Nakashima M, Tokuo K, Kaminaga K, et al. Experimental study of a self-propelled two-joint dolphin robot[C]//9th International Offshore and Polar Engineering Conference. Cupertino, CA, USA: International Society of Offshore & Polar Engineers, 1999: 419-424.
- [11] Wang T M, Liang J H, Shen G X, et al. Stabilization based design and experimental research of a fish robot[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 954-959.
- [12] 梁建宏, 邹丹, 王松, 等. SPC-II 机器鱼平台及其自主航行实验[J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, 31(7): 709-713. Liang Jianhong, Zhou Dan, Wang Song, et al. Trial voyage of SPC-II fish robot[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(7): 709-713.
- [13] Liang J H, Wang T W, Wang S, et al. Experiment of robofish aided underwater archaeology[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 499-504.
- [14] 梁建宏. 水下航行体仿生推进机理研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006. Liang Jianhong. Propulsive mechanism of bionic undersea vehicle[D]. Beijing: Beihang University, 2006.
- [15] Ying L, Zhu J. Screw design and implementary on comparison UUV[R]. China: China Ship Scientific Research Center, 2006.
- 作者简介:**  
梁建宏 (1977-), 男, 博士, 讲师. 研究领域: 仿生机器人, 微小型飞行器.  
郑卫丰 (1986-), 男, 硕士生. 研究领域: 仿生航行器控制.  
文力 (1982-), 男, 博士生. 研究领域: 仿生机器鱼动力学.