

A Novel 3-D Locomotion Biomimetic Robot Fish with Multiple Sensors

Xiang Dong, Zhiqiang Cao, Shuo Wang, Chao Zhou, Min Tan

Laboratory of Complex Systems and Intelligence Science, Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080(E-mail:dong@compsys.ia.ac.cn)

Abstract—In this paper, a novel biomimetic robot fish FAC-I with 3-D locomotion is designed for underwater exploration and surveillance. It is equipped with CCD camera, infrared and pressure sensors to acquire the outside information. The robot fish has a tail thruster imitating the dolphin motion, a pair of pectoral fins and a buoyancy-adjusting mechanical structure BAMS. The tail thruster provides the main propulsion and the pectoral fins are applied to complete the motions such as turning. The BAMS may adjust the volume of the FAC-I by stretching/shrinking a piston to change the robot fish's buoyancy and then the descending/ascending motions may be achieved. In order to implement the information exchange between biomimetic robot fish under water and the console on the ground, an information relay on water combing wireless and wired communication is designed. An environment monitoring platform is developed for displaying the information provided by a CCD camera of FAC-I and recognizing the goal based on the given color. The experiments show the effectiveness of FAC-I.

Key words—Biomimetic robot fish, underwater exploration and surveillance, 3-D locomotion, Information relay

一种新型的三维运动多传感器仿生机器鱼系统

董翔 曹志强 王硕 周超 谭民

中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学重点实验室 北京 100080

摘要 本文面向水下探测监视等任务,设计了一种装备视觉、红外、压力传感器的新型三维运动仿生机器鱼FAC-I,包括模拟海豚运动的尾部、一对胸鳍以及浮力调节机构。机器鱼依靠尾部提供前进的动力,通过对胸鳍的控制实现转弯等运动,浮力调节机构通过控制一个活塞伸出或者缩进体内以改变机器鱼体积的方式实现对浮力的改变,进而实现浮潜运动。为了建立水下仿生机器鱼与地面控制台之间信息的联系,设计了一个采用无线与有线通讯方式相结合的水面信息中继,开发了一个环境监控平台以实现机器鱼视觉信息的实时显示以及基于颜色的目标识别。实验表明仿生机器鱼系统设计的有效性。

关键词 仿生机器鱼,水下探测监视,三维运动,信息中继

1. 引言

鱼类作为自然界最早出现的脊椎动物,在长期的自然选择中,完美的适应了水下环境。既可以在持久游速下保持低能耗、高效率,也可以在拉力游速或爆发游速下实现高机动性。随着人类开发海洋资源活动的不断增加,水下作业任务发生了很大的变化,提出了很多新的要求,原有

的水下检测、作业、运载装置难以满足复杂水下作业的需求,加之人工操作方式在某些情况下会给人的安全带来直接或间接的损害,这就促使人类研究智能、灵活的新型水下机器人。考虑到普通的水下推进器能量利用率低、对环境扰动大、隐蔽性能差、运动灵活性能差等缺点,受鱼类亿万年进化的成就(独特的身体结构、非凡的感知系统、超强的适应能力、复杂的群体行为)的启发,研究人员希望将鱼类的高效、快速、机动灵活的特点与机器人技术结合起来,依照仿生学原理,结合控制、电子、材料、机械

国家自然科学基金杰出青年项目(No.60725309),国家自然科学基金项目(No.60605026, No.60635010),国家863计划项目(No.2006AA11Z225)

等学科, 制作出跟真鱼一样的仿生机器鱼, 为研制新型的水下航行器提供了一种新思路。仿生机器鱼的研究已经成为一个热点, 一旦步入应用, 仿生机器鱼将在水域安全保卫、军事侦察、海洋生物观察、水下救捞、水下考古等方面发挥重要作用。

鱼类推进方面的研究很早就受到研究者的关注^{[1]-[6]}。

Lighthill 在 1960 年基于“小振幅位势理论”建立了分析鲭科鱼类推进模式的数学模型^[1]。Wu 通过潜流理论和线性化边界条件提出了“二维波动板理论”, 将鱼视为一薄板, 用于分析鲭科鱼类的水动力学特性^[3]。Triantafyllou 等研究发现在自行驱动鱼类身体后部有射流形成, 这些喷射的涡流在产生推力方面起着重要的作用^{[4][5]}。中国科技大学的童秉纲和程健宇提出了三维波动板理论^[6]。

在鱼类推进机理深入研究的基础上, 研制快速、高效、高机动性的机器鱼已成热点。自 1994 年麻省理工学院 (MIT) 成功研制出世界上第一条真正意义上的仿生机器鱼后, 许多国内外研究机构加快了研究进度, 研制出了一系列的仿生机器鱼。美国东北大学海洋科学中心利用形状记忆合金 (SMA) 和链杆机构开发了波动推进的机器鳗鱼, 通过身体侧向的波动, 能控制其浮游深度。Kato 研究了对胸鳍推进机构的控制, 并开发了机器鱼样机黑鲈 (Blackbass)^[7]。日本名古屋大学 Fukuda 教授对微型仿鱼水下推进器进行了研究, 先后研制出采用形状记忆合金驱动的微型身体波动式水下推进器和压电陶瓷驱动的双鳍鱼型微机器人^[8]。日本运输省船舶技术研究所研制的一系列机器鱼, 包括 UPF-2001, PF-550 (上浮/下潜) 等。英国 Essex 大学研制了 MT 系列机器鱼^[9]。国内在仿生机器鱼研制方面, 北京航空航天大学机器人研究所^{[10][11]}、中科院沈阳自动化研究所、哈尔滨工程大学、哈尔滨工业大学^[12]、华中理工大学、北京大学、中国科学院自动化研究所^{[13]-[16]}等相关研究机构也开展了卓有成效的工作。

为了能够安全的完成水下探测监视、水域安全保卫等任务, 一方面, 机器鱼应装配视觉、红外、压力等传感器, 另一方面, 机器鱼还应当具备三维运动能力。文献[10]给出了几种机器鱼三维运动设计的常用方法, 包括储水舱法、胸鳍法、改变重心位置法、改变头部俯仰角度法、改变尾部俯仰角度法等。本文提出一种新型的方法: 浮力调节法。通过控制一个活塞伸出或者缩进鱼体内, 改变机器鱼体积来实现对浮力的调节。该方法跟储水舱法 (机器鱼体内安装一个储水舱, 通过改变储水舱内水的多少实现对重力的调节) 原理类似, 都属于通过改变浮力和重力的相对大小关系来进行调节的。该方法尽管反应延时较大, 机构占用空间较大, 但是可以在零速或低速下较好实现浮潜运动。

本文设计了一种仿海豚尾部、三自由度胸鳍系统的多

传感器机器鱼 FAC-I, 配合活塞的运动控制, 保证了机器鱼的运动能力。利用一个水面信息中继将水下仿生机器鱼与地面控制台联系起来, 为了便于视觉等信息的实时显示以及后续处理, 开发了一个环境监控平台。仿生机器鱼系统设计与控制的有效性通过运动实验进行验证。

2. 仿生机器鱼结构设计与控制

如图 1 所示, 仿生机器鱼 FAC-I 以做上下拍动动作的仿生尾部作为推进的主要动力来源, 而胸鳍用于完成转弯等动作, 仿鱼鳔功能的浮力调节机构实现上升下潜。为了增强机器鱼对环境的感知能力, 为机器鱼选择适当的传感器 (包括视觉传感器、红外传感器、压力传感器等), 并进行了合理的布局。图 1(a)和(b)分别为仿生机器鱼机构的主视图与俯视图。机器鱼尾部模拟海豚的尾部, 由曲柄滑块机构和滑块摇杆机构串连起来构成, 通过一个直流电机驱动做上下拍动。仿照鱼类的鱼鳔作用, 设计了一个用步进直线电机驱动的活塞, 安装于机器鱼的浮心, 活塞的运动改变机器鱼的体积以改变机器鱼所受到的浮力, 进而实

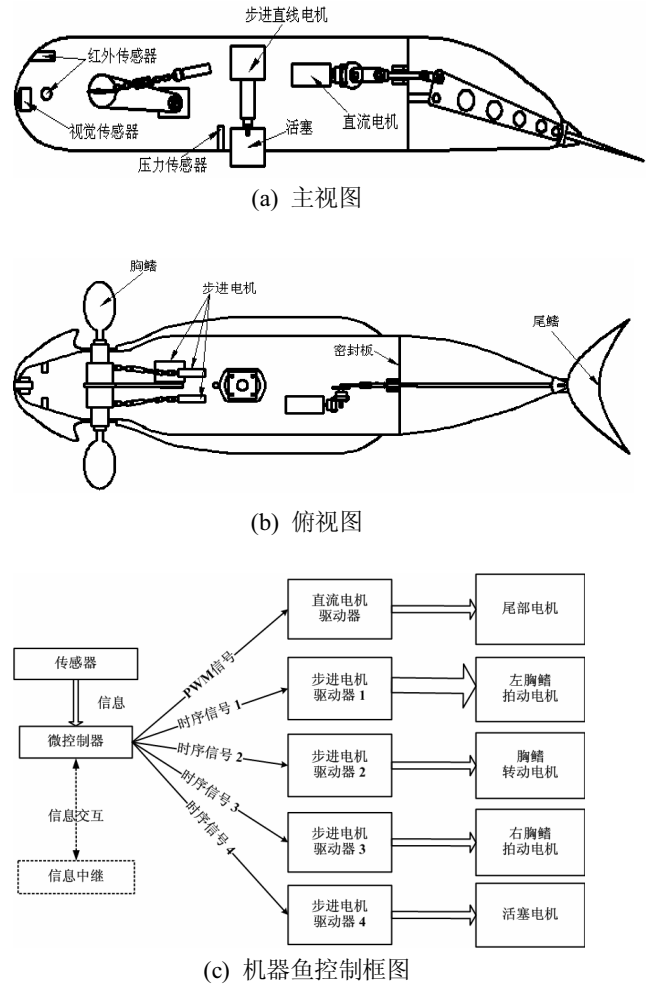


图 1 仿生机器鱼结构与控制

现上升下潜。这里要求活塞所在的腹腔和柔软的尾部隔离密封(通过密封板实现),以避免活塞运动的时候尾部体积变化而影响调节效果。为了保证机器鱼胸鳍运动的灵活性和可控性,设计每个胸鳍有两个自由度(转动和拍动),且让它们的转动耦合在一起,从总体上来看,共有三个自由度,分别由三个步进电机控制。具体控制时,微控制器产生 PWM 信号通过电机驱动器控制尾部直流电机,调节电机的转速达到控制尾部摆动频率的目的;产生时序信号分别控制胸鳍的三个步进电机和活塞的步进直线电机,实现胸鳍的运动和活塞的进出,见图 1(c)。

3. 水面信息中继

为了更加充分的发挥仿生机器鱼的作用,需要建立仿生机器鱼与外界的联系。从目前研究来看,单纯依靠无线通讯设备的仿生机器鱼,由于电磁波水中的严重衰减,这使得机器鱼只能在水面运动,或者定时上浮至水面交换数据,很大程度上限制了仿生机器鱼的工作;另有一些机器鱼通过电缆(或光缆)直接与地面控制台连接以保证信息传输的速度和准确程度,但是,机器鱼游动范围受限。为此,本文设计的机器鱼考虑将有缆和无线这两种方式结合起来,给出一种基于水面中继的信息传输,能够较好的满足仿生机器鱼系统的要求。如图 2 所示,待传输的信息分为数字信号和视频信号,仿生机器鱼摄像头提供的视频信息传输过程如下所述:视频信息通过光发射机转化为光信号,通过光缆接入水面信息中继中的光接收机转化为电信号,再通过高频无线方式发射出去,由地面控制台的高频模块接入图像采集卡中。数字信号的传输过程如下:机器鱼微处理器发出的数字信号经过电平转换、电缆、水面信息中继内电平转换后,通过低频无线方式传送到低频模块,接收后送入地面控制台;由地面控制台发送的数字信号可通过与上述过程相反的传输转换流程传送给水下仿生机器鱼。从而,实现数字信号的双向传送。

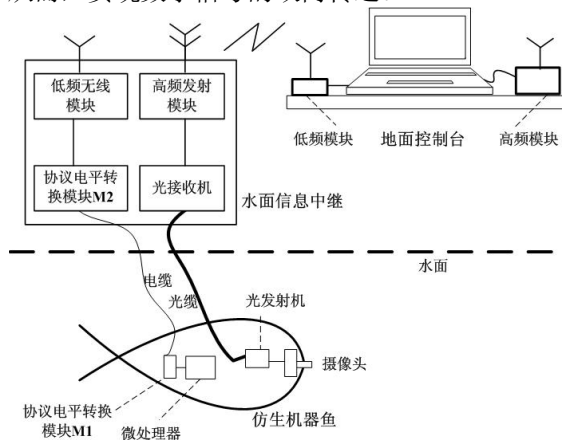


图 2 仿生机器鱼水面信息中继结构图

仿生机器鱼水面信息中继采用水面浮标装置将水下仿生机器鱼和地面控制台联系起来,水面浮标装置与仿生机器鱼之间通过光缆和电缆连接,水面浮标与地面控制台之间采用无线方式传递信息,能够较好地满足仿生机器鱼大范围运动的需要。

4. 环境监控平台

机器鱼视频等传感信息通过水面信息中继发送到地面控制台后,考虑到信息的实时显示以及后续处理,开发了一个环境监控平台。为了从机器鱼获得的图像中得到环境和目标信息,图像分割是分析处理的基础,常用的有阈值比较法、区域生长法、像素迭代聚类法等。其中,阈值分割是一种比较简单的基于区域的技术,它的基本思想是把每个像素的灰度或颜色值与一个阈值T进行比较,根据该像素的灰度或颜色值是否在阈值范围内而将该像素归于背景或前景。当 CCD 摄像头在水下采集图像时,其工作环境和在陆地上是不同的,水下环境比较恶劣,水体对光的吸收等效应会使得水下图像的分辨率和信噪比降低,在这种情况下,采用固定阈值对图像进行分割难以获得好的效果,为此,在传统阈值分割方法的基础上,给出一种基于目标图像阈值自适应调整的图像分割方法。考虑到水流对光线的折射等影响,对同一颜色属性物体测得的 RGB 颜色值分布很分散,且 3 个分量关联变化,采用 YCbCr 模型,可以通过 RGB 模型线性变换得到,其中 Y 是指明视度, Cb、Cr 是指色调。另外,由于 Y 分量在不同环境光照的影响下会发生变化,所以不适合用来作为分割图像的依据,而 Cb 和 Cr 分量受环境光照的影响不大,所以在做图像分割时选取这两个分量作为分割的判别依据。在对图像中的每个像素进行判断时,满足:

$Cb_{ThresL} < Cb < Cb_{ThresH} \cap Cr_{ThresL} < Cr < Cr_{ThresH}$ 条件的就认为是目标点,其中, Cb_{ThresL} 和 Cb_{ThresH} , Cr_{ThresL} 和 Cr_{ThresH} 分别为 Cb, Cr 分量的最小阈值和最大阈值。

自适应阈值方法具体描述如下:

- 1) 确定目标图像在某种光照下的阈值,称之为基本阈值;
- 2) 采用 Sobel 算子,在基本阈值的基础上,将图像中所有物体的边缘(与周围像素灰度有阶跃变化的像素的集合)提取出来;
- 3) 为了找出目标的边缘,忽略其它物体的边缘,求取边缘点的 Cb 分量与基本阈值 $Cb_{iniThresL}$ 、 $Cb_{iniThresH}$ 之间的距离 $dCbL$ 和 $dCbH$, Cr 分量和 $Cr_{iniThresL}$ 、 $Cr_{iniThresH}$ 之间的距离 $dCrL$ 和 $dCrH$, 当满足:

$$\min(dCbH, dCbL) < ThresCb \cap \min(dCrH, dCrL) < ThresCr$$

时认为该像素是目标的边缘，该像素集合用 O 来表示，其中， $ThresCb$ 和 $ThresCr$ 是选取的距离阈值；

4) 计算出目标的重心 $(x_c(O), y_c(O))$ ；

5) 基于重心周围计算出自适应阈值 5×5 模板内的25个像素（构成集合 D ）的值，得到自适应阈值， Cb 分量的最小和最大阈值分别计算如下：

$$Cb_{ThresL} = \sum_{(i,j) \in D} Cb(i,j) / 25 - \dim Cb / 2 \quad (1)$$

$$Cb_{ThresH} = \sum_{(i,j) \in D} Cb(i,j) / 25 + \dim Cb / 2 \quad (2)$$

Cr 分量的最小和最大阈值计算如下：

$$Cr_{ThresL} = \sum_{(i,j) \in D} Cr(i,j) / 25 - \dim Cr / 2 \quad (3)$$

$$Cr_{ThresH} = \sum_{(i,j) \in D} Cr(i,j) / 25 + \dim Cr / 2 \quad (4)$$

其中，阈值

$$\dim Cb = Cb_{iniThresH} - Cb_{iniThresL} \quad (5)$$

$$\dim Cr = Cr_{iniThresH} - Cr_{iniThresL} \quad (6)$$

利用上述得到的自适应阈值对原图像进行二值化图像分割、平滑后，采用形态学的闭操作来平滑边界和填充小孔。最终，将所要识别的目标从图像中提取出来。

5. 实验

集成所有部件后的仿生机器鱼系统如图3。通过机器鱼尾部、胸鳍系统以及活塞机构的相互配合，可以实现前行、上浮/下潜、左转/右转等基本运动。仿生机器鱼FAC-I相关参数见表1。图4给出了仿生机器鱼拖曳水面浮标装置在游泳池中依靠尾鳍的拍动向前游动的一个图像序列。仿生机器鱼一次上浮的过程见图5，尾部停摆，依靠活塞的调节实

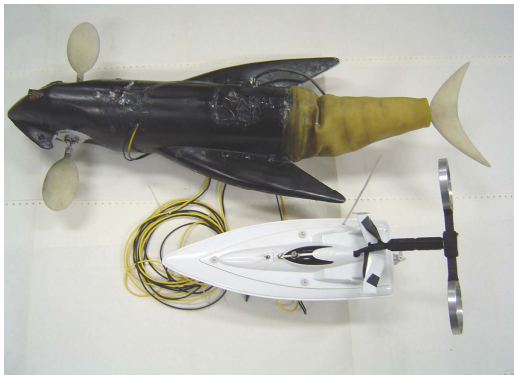


图3 仿生机器鱼样机及其水面信息中继

表1 仿生机器鱼参数

| 参数 | 值 |
|--------------------------|----------|
| 尺寸(cm ³) | 87×29×25 |
| 重量(kg) | 9.4 |
| 胸鳍拍动频率(Hz) | 2.4 |
| 尾鳍拍动频率(Hz) | 2.8 |
| 游动时间(h) | 1.5~2 |
| 游动速度(m/s) | 0.25 |
| 下潜加速度(m/s ²) | 0.04 |

现，从图中可以看出，仿生机器鱼可以依靠活塞筒的调节改变机器鱼的体积从而实现相应的运动。图6给出了仿生机器鱼环境监控平台的一个采样结果。其中，A、B分别描述了机器鱼前方环境相关信息和基于C中预先指定颜色特征的识别结果，这为后续的处理打下基础。

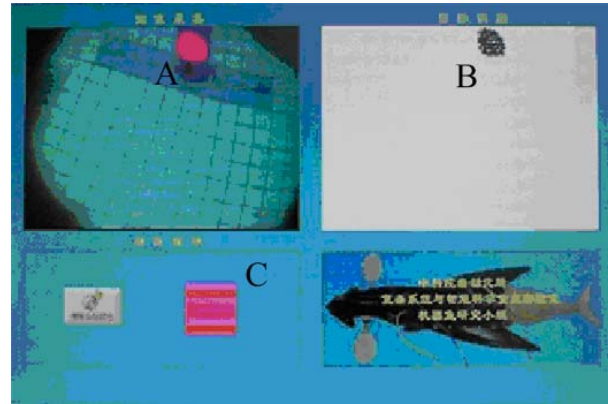


图6 环境监控平台显示与识别

6. 结论

本文给出了一种新型的仿生机器鱼FAC-I的设计，包括仿海豚运动的尾部、三自由度胸鳍系统以及三维运动用活塞调节机构，它装备视觉、红外、压力传感器以满足信息获取的需求。设计了一种水面信息中继解决了仿生机器鱼在水下的信息与地面控制台之间的通讯问题，开发了一个环境监控平台以实现机器鱼视觉等信息的实时显示以及基于颜色的目标提取。上述设计的有效性通过实验得到验证，下一步工作将致力于机器鱼自身能力（运动能力、信息获取与处理能力等）的提高。

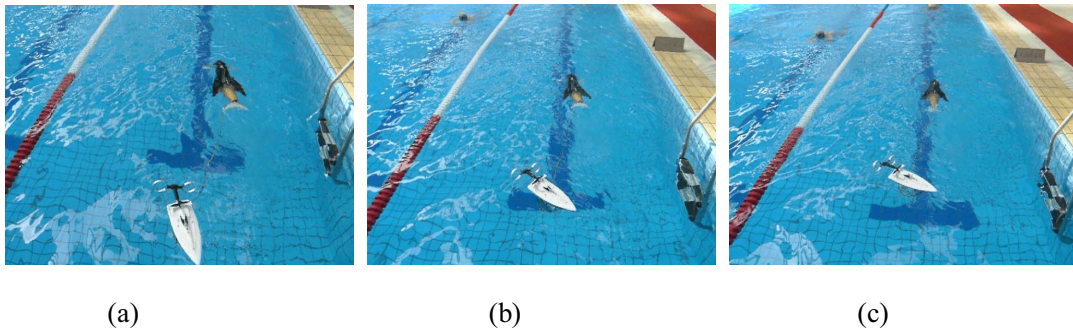


图 4 仿生机器鱼游动图像序列

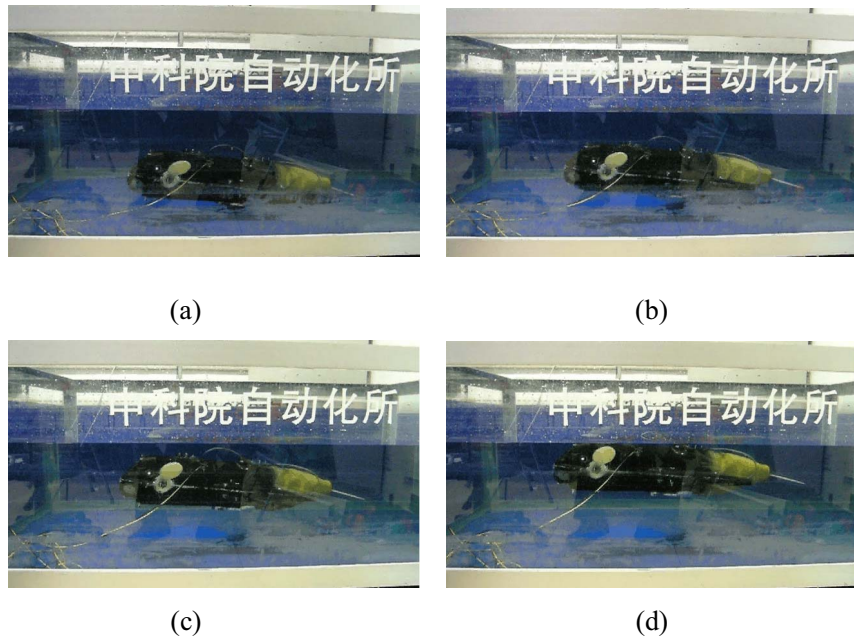


图 5 仿生机器鱼上浮图像序列

参考文献

- [1] Lighthill M J. Note on the swimming of slender fish. *J. Fluid Mech.* 1960, 9: 305-317
- [2] Lighthill M J. Large-amplitude elongated-body theory of fish locomotion. *Proc. R. Soc. Lond, Ser. B.* 1971, 179: 125-138
- [3] Wu T Y. Swimming of a waving plate. *J. Fluid Mech.* 1961, 10: 321-344
- [4] Triantafyllou M S, Barrett D S, Yue D K P. A new paradigm of propulsion and maneuvering for marine vehicles. *Trans. Soc. Naval Architects Marine Eng.* 1996, 104: 81-100
- [5] Triantafyllou M S, Triantafyllou G S. An efficient swimming machine, *Scientific American*, 1995, 272(3): 64-70
- [6] Cheng J, Zhuang L, Tong B. Analysis of swimming of three-dimensional waving plates. *J. Fluid Mech.* 1991. 232: 341-355
- [7] N Kato, M Furushima. Pectoral Fin Model for Maneuver of Underwater Vehicles. *Proceedings of the 1996 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology.* 1996: 49-56
- [8] T Fukuda, A Kawamoto, F Arai, H Matsuura. Mechanism and swimming experiment of micro mobile robot in water. *Proceedings, IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems.* 1994: 273-278
- [9] J. Liu, H. Hu. Novel mechatronics design for a robotic fish. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Edmonton, Canada, 2005, 2077-2082*
- [10] 梁建宏, 王田苗, 魏宏兴. 仿生机器鱼技术研究进展及关键问题探讨. *机器人技术与应用*, 2003, 3: 14-19
- [11] 梁建宏, 邹丹等. SPC- 机器鱼平台及其自主航行实验. *北京航空航天大学学报*, 2005, 31(7): 709-713
- [12] 刘军考. 仿鱼水下推进器理论与试验研究. [博士学位论文].

哈尔滨：哈尔滨工业大学，2001

- [13] 沈志忠. 仿生机器鱼信息处理和控制在研究. [博士学位论文]. 北京：中国科学院研究生院, 2006
- [14] 桑海泉. 基于传感器的仿生机器鱼智能控制在研究. [博士学位论文]. 北京：中国科学院研究生院, 2005

[15] 喻俊志. 多仿生机器鱼控制在协调研究. 中国科学院研究生院工学博士学位论文. 2003

[16] 张志刚. 仿生机器鱼设计、控制在自主避障研究. [硕士学位论文]. 北京：中国科学院研究生院, 2004