仿生机器鱼俯仰与深度控制方法

周 超 [1] 曹志强 [1] 王 硕 [1] 谭 民 [1]

摘 要 提出一种基于重心改变法的仿生机器鱼俯仰姿态与深度控制方法, 用于实现机器鱼水中的浮潜运动. 该方法利用一种可调整位置的配重块结构, 改变机器鱼的重心位置, 进而实现机器鱼俯仰姿态的调节. 在对机器鱼内部配重块位置和机器鱼俯仰角的关系进行分析的基础上, 对一定速度下机器鱼的深度与俯仰角的关系进行建模, 提出由于尾部形变引起的俯仰姿态变化的补偿方法. 文中给出机器鱼原形样机的相关实验, 分析验证配重块位置变化和机器鱼重心及其姿态的调整, 深度控制等在多种情况下的结果.

关键词 仿生机器鱼, 重心调节, 俯仰控制, 深度控制
中图分类号 TP24

Study on the Pitching and Depth Control of Biomimetic Robot Fish

ZHOU Chao[1] CAO Zhi-Qiang[1]
WANG Shuo[1] TAN Min[1]

Abstract In the paper, a heave locomotion robotic fish TPF (Three DOFs posture-controllable fish robot) is proposed, which is composed of a multi-linked oscillating tail and a barycenter-adjustor which can change the robot-fish′s center of gravity by moving an inside weight. The pitching angle and submergence of the robotic fish are analyzed. In order to make such a biomimetic robot realize heave locomotion and suspend in water, a control paradigm is proposed. In this paradigm, multi-link propulsive system and pitching angle are controlled separately and work together. The propulsive system keeps the robotic fish at a uniform speed based on swimming gaits and oscillating frequency. And a controller with deformation compensation is presented to adjust the turning angle of the barycenter-adjustor′s servo motor on the basis of the depth feedback. Experimental results show that the proposed control method is valid, and its performance is much better than that of a general controller in depth maintaining of robotic fish TPF.

Key words Biomimetic robot fish, barycenter-adjustor, posture control, depth control

受鱼类具有高度环境适应性的启发, 在深入探讨其运动模式、特点和机理的基础上, 结合控制、电子、材料以及机械等学科, 将仿生学原理应用于水下机器人, 研制出仿生机器鱼, 希望在高效、高机动性和低噪声等方面取得突破, 很多国家的科研机构都在仿生机器鱼机构以及感知、驱动等方面开展研究, 产生了一批实验系统[1−12].

收稿日期 2007-02-07 收修改稿日期 2007-07-10
Received February 7, 2007; in revised form July 10, 2007
国家自然科学基金 (50475179, 60635010, 60605026), 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2006AA11Z225, 2006AA04Z258), 中国科学院自动化研究所青年科技创新基金资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (50475179, 60635010, 60605026), National High Technology Research and Development of China (863 Program) (2006AA11Z225, 2006AA04Z258), and Innovation Fund for Young Scientists of Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences
1. 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 100190
1. Key Laboratory of Complex Systems and Intelligence Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2008.01215

为了提高任务的环境适应性, 需要机器鱼具有水中的三维运动能力, 也就是需要机器鱼除了推进外能够上浮下潜, 甚至维持某一深度. 文献 [9] 给出几种浮潜方案: 储水仓法、胸鳍法、身体形状改变法以及重心改变法. 这几种方法在机构复杂性和控制效果上有较大差别, 各有优缺点. 从总体看来, 大部分机器鱼样机选用胸鳍法[6, 9, 11−12], 其他方式也有应用[10]; 同时大多数研究集中于如何实现浮潜运动, 而对于姿态调整和深度的控制研究相对较少. 本文在已有多关节仿生机器鱼基础上, 设计一种新型机器鱼 TPF (Three DOFs posture-controllable fish robot), 基于重心改变法, 完成仿生机器鱼的俯仰和浮潜运动. 设计的机器鱼既可以在静止中俯仰又可以在运动中浮潜, 响应迅速, 动态特性好. 分析机器鱼配重块位置的改变和机器鱼俯仰运动学方程, 建立了机器鱼的深度和俯仰角度、速度的模型. 给出深度控制方法, 并给出仿真验证模型的正确性和控制方法的有效性. 在实验室环境下给出实验验证方法的可行性.

1 仿生机器鱼结构与俯仰分析

仿生机器鱼结构简图见图 1, 三个关节带动尾鳍摆动, 提供机器鱼前进的动力, 电池组、控制模块、通讯模块等均安装在鱼头内部. 机器鱼底部安装了压力传感器, 用于测量水深. 鱼头部分有一配重块铜块, 由一个舵机控制其左右摆动, 可达到重心调整的目的, 进而可实现机器鱼俯仰的控制, 在运动中俯仰一定的角度, 就可以实现浮潜.

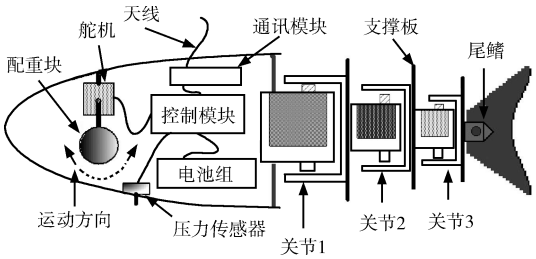

图 1 仿生机器鱼结构简图
Fig. 1 The structure of biomimetic robot fish

1.1 俯仰分析

仿生机器鱼依靠尾部的摆动推进鱼体前进, 其推进运动方程涉及水动力学等问题, 建立完备的运动学方程是一件比较困难的事情, 本文给出了一种描述在恒定速度下, 机器鱼浮潜运动的简化模型. 在机器鱼运动中, 实时的俯仰角度决定了浮潜和深度. 当配重块位置因为舵机而变化, 俯仰角度随之变化. 所以需要分析舵机的角度和俯仰角的关系. 首先定义机器鱼在初始静态的受力, 如图 2.

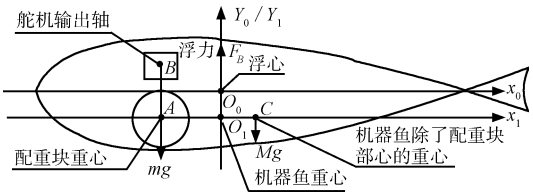

图 2 机器鱼初始重力和浮力作用
Fig. 2 The gravity and buoyancy acted on the fish robot in initial still state

图 2 中 O_0, O_1 分别是浮心和重心, 以它们为原点, 建立如图坐标系, $X_0O_0Y_0$ 和 $X_1O_1Y_1$, 机器鱼总重量是 $M+m$,

m 是配重块的质量, M 是机器鱼除了配重块部分的质量, 其他符号如图所说明.

为了简化分析, 首先给出一些合理的假设:

1) 机器鱼完全没入水中, 处于水中悬浮状态;

2) 所有的力都在垂直平面, 机器鱼的尾部电机的摆动垂直于此平面;

3) 机器鱼在初始时刻是水平的, 即头尾轴向是水平的.

此时, 舵机的摆角 θ 和俯仰角 α 均为零. 当机器鱼达到新的平衡的时候, 机器鱼的力矩平衡方程为

$$MgD_2 = mgD_1 \tag{1}$$

基于以上假设和定义, 分析俯仰角 α. 当舵机向前偏转角度 θ 时 (顺时针方向), 配重块也向前运动, 机器鱼随之运动到俯仰角为 α 的位置, 如图 3 所示.

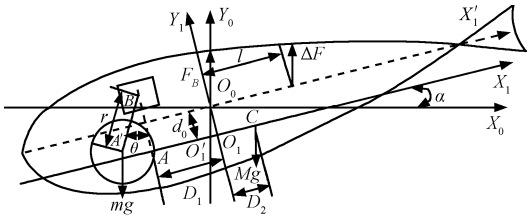

图 3 机器鱼俯仰稳态受力分析

Fig. 3 The gravity and buoyancy acted on the fish robot in a steady state

坐标系 $X_1O_1Y_1$ 也旋转到 α 的位置, 重心从 O_1 移动到 O_1', 除了配重块部分的重心 C 在坐标系 $X_1O_1Y_1$ 里是不变的. 根据机器鱼的结构和图中标注的参数, 可以将式 (1) 写成

$$\begin{aligned}&Mg(D_2\cos\alpha + d_0\sin\alpha) = \\ &mg[(D_1 + r\sin\theta)\cos\alpha + (r - r\cos\theta)\sin\alpha - d_0\sin\alpha]\end{aligned} \tag{2}$$

同理, 当舵机旋臂向后运动 (逆时针方向) 运动的时候, 可以得到

$$\begin{aligned}&Mg(D_2\cos\alpha - d_0\sin\alpha) = \\ &mg[(D_1 - r\sin\theta)\cos\alpha - (r - r\cos\theta)\sin\alpha + d_0\sin\alpha]\end{aligned} \tag{3}$$

从上式可以得到配重块从初始位置旋转 θ 角度的时候, 机器鱼体处于稳态的俯仰角度为

$$\tan\alpha = \frac{mr\sin\theta}{(M+m)d_0 - mr(1-\cos\theta)} \tag{4}$$

其中, α 是俯仰角也是轴 X_0 和轴 X_1, 且 $\alpha \in (-\pi/2, \pi/2)$, 逆时针为正.

以上是机器鱼在零速度情况下基于机器鱼的重心变化计算俯仰角度, 如果机器鱼以一定的速度前进, 那么机器鱼 TPF 就可以实现下潜和上浮. 当机器鱼在水下运动, 以某个速度匀速前进的时候, 如图 4 所示, 机器鱼摆尾产生的推动力和作用在鱼体上的摩擦力相等, 同时重力和浮力相等. 机器鱼的速度可以依照角度 α 分成两部分, V_{X0} 和 V_{Y0}, 分别是水平方向的前进速度和垂直方向的下潜 (上浮) 速度.

所以, 在时刻 t, 根据稳定状态分析

$$\dot{h}(t) = V_{Y0}(t) = V(t)\sin\alpha(t) \tag{5}$$

其中 $\dot{h}(t)$ 是深度 $h(t)$ 的微分, $V_{Y0}(t)$ 是 $V(t)$ 的垂直分量, $\alpha(t)$ 是机器鱼在时刻 t 的俯仰角, 于是对式 (5) 积分得到机器鱼的实时深度.

$$\begin{aligned}&h(t) = \int \dot{h}(t)\mathrm{d}t + h_0 = \\ &\int V(t)\sin\alpha(t)\mathrm{d}t + h_0 = \\ &\int V(t)\sin\left(\arctan\frac{mr\sin\theta}{(M+m)d_0 - mr(1-\cos\theta)}\right)\mathrm{d}t + h_0\end{aligned} \tag{6}$$

其中 $h(t)$ 是机器鱼在 t 时刻的深度, h_0 是机器鱼初始深度, $V(t)$ 是机器鱼在 t 时刻的速度, 这就是仿生机器鱼 TPF 的深度运动模型.

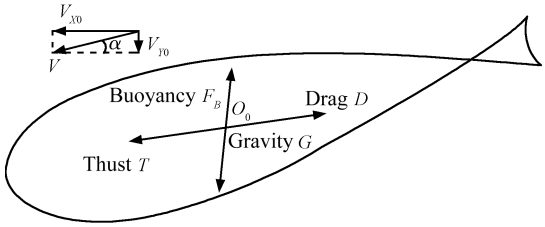

图 4 机器鱼运动中受力分析

Fig. 4 The forces acted on the fish robot and decomposition of the fish robot′s velocity

2 深度控制方法

2.1 控制系统结构

根据以上分析, 机器鱼的深度运动控制是个非线性系统, 尽管机器鱼的模型中的参数在式 (6) 中给出, 这个系统的辨识仍然是个困难的问题, 为该模型设计一个稳定、最优的控制系统也是困难的, 从工程的角度讲, 需要给出一个切实可行的控制方法来实现机器鱼的深度保持. PID 控制器是一个广泛使用的控制器, 可以在对象不完全清楚的情况下, 通过调节三个参数来控制对象, 本文在机器鱼的运动中, 使用这一方法控制机器鱼的浮潜和深度, 机器鱼的速度依靠尾部关节的不同的频率和振幅来控制.

$$u_a(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{i=0}^{k} e(i) + K_D[e(k) - e(k-1)] \tag{7}$$

其中 $u_a(k)$ 是控制器在第 k 个控制周期的输出, 也就是舵机此时的转角. K_P, K_I 和 K_D 是控制器的比例、积分和微分三个参数, $e(k)$ 是偏差, $e(k) = h_d - h(k)$. 通过该方法, 机器鱼的深度可以保持在一定深度.

2.2 形变补偿

通过大量实验发现, 即使仔细调整 PID 控制器参数 K_P, K_I 和 K_D, 也难以较好地维持机器鱼运动于某一深度, 其原因是多方面的. 由于机器鱼在水中游动, 有很多不确定因素影响其运动: 比如推进部分的振动和游动节律的变化, 因为其规律复杂, 没有被考虑; 同时, 机器鱼的波动和身体弯曲会改变推进力, 进而影响匀速运动; 还有许多有待研究的水动力学的问题. 对于仿生机器鱼 TPF, 实验发现最重要的是鱼体尾部柔软的橡胶蒙皮的变形而引起的体积变化. 机器鱼尾部是用柔软的橡胶皮套管整体密封, 因此深度变化的时候, 尾部的体积会因为水压的变化, 而有微小的形变. 虽然该形变比较小, 对于机器鱼的运动姿态影响也比较小, 但是由式 (6) 可发现, 深度和速度是积分关系, 因而随着时间变化, 误差会被积累, 从而会引起深度误差加大. 故需要引进补偿量以改善控制效果.

机器鱼尾部的体积因为水压而略微变小, 浮力也随之减小, 为了便于分析, 引进浮力变化量: ΔF, 令

$$\Delta F = F_0 - F_B \tag{8}$$

其中 F_0 是机器鱼在水面时受到的浮力, 也就是没有形变的时候. F_B 是在当前受到的浮力. 于是力矩平衡方程 (2) 可以写为

$$\begin{aligned}&Mg(D_2\cos\alpha' - d_0\sin\alpha') + \Delta Fl\sin\alpha' = \\ &mg[(D_1 - r\sin\theta)\cos\alpha' - (r - r\cos\theta)\sin\alpha' + d_0\sin\alpha']\end{aligned} \tag{9}$$

从而

$$\tan\alpha' = \frac{mr\sin\theta - \frac{\Delta Fl}{g}}{(M+m)d_0 - mr(1-\cos\theta)} \tag{10}$$

也就是说, 浮力变化的时候, 机器鱼在配重块转角为 θ 时的俯仰角 α' 变化了, 因为压力引起的重心变化利用配重块的变化来补偿, 就是在改变配重块的位置 θ 为 $\theta' = \theta + \sigma$ 使得机器鱼仍然保持设想的姿态, 即: $\alpha' = \alpha$, 于是

$$\frac{mr\sin - \frac{\Delta Fl}{g}}{(M+m)d_0 - mr(1-\cos\theta')} = \frac{mr\sin\theta}{(M+m)d_0 - mr(1-\cos\theta)} \tag{11}$$

考虑到俯仰角 α 的变化是个较小量, 对应的 θ 的变化也是小量, 即 σ 是小量, 从上式中可以解得

$$\sigma = \frac{dm\frac{\Delta Fl}{g} + dM\frac{\Delta Fl}{g} - rm\frac{\Delta Fl}{g} + rm\frac{\Delta Fl}{g}\cos(\theta)}{dm\cos(\theta) + dM\cos(\theta) - rm\cos(\theta) + rm\cos(\theta)^2 + r^2m^2\sin(\theta)^2} \tag{12}$$

考虑到该补偿量主要是在平衡的时候发挥作用, 故在 $\theta \to 0$ 的条件下化简, 得到

$$\sigma = \frac{\Delta Fl}{mrg} \tag{13}$$

利用理想气体方程得到

$$\Delta V = \frac{nRT}{P_1} - \frac{nRT}{P_0} \tag{14}$$

其中 V 是与尾部相通的所有空气的体积, ΔV 是这部分的体积变化. ρ 是水的密度. T 和 P_0 都是初始配重块时的温度和压强. $P_1 = \rho gh + P_0$, 于是得到

$$\sigma = \frac{\Delta Fl}{mrg} = \frac{\Delta V\rho gl}{mrg} = \frac{l\rho}{mr}\left(\frac{nRT}{P_1} - \frac{nRT}{P_0}\right) \tag{15}$$

当仿生机器鱼在浅水中游动时, 水产生的压强远小于 P_0, 利用泰勒级数展开上式得到

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{\rho nlRT}{mr\rho g}\left(\frac{1}{h + \frac{P_0}{\rho g}} - \frac{1}{\frac{P_0}{\rho g}}\right) = \\ &\frac{nlRT}{mrg}\left(\left(\frac{P_0}{\rho g}\right)^{-1} - \left(\frac{P_0}{\rho g}\right)^{-2}h + \left(\frac{P_0}{\rho g}\right)^{-3}h^2 + \cdots - \frac{1}{\frac{P_0}{\rho g}}\right) = \\ &\frac{nlRT}{mrg}\left(-\left(\frac{P_0}{\rho g}\right)^{-2}h\right) = -\frac{nlRT\rho^2 g}{mrP_0^2}h\end{aligned} \tag{16}$$

其中 h 的系数是个常数, 该式是简单的乘法运算, 实现时非常容易. 于是可以得到控制量

$$\begin{aligned}&u_{ac}(k) = u_a(k) + u_c(k) = \\ &K_p e(k) + K_I\sum_{i=0}^{k} e(i) + K_D[e(k) - e(k-1)] + K_h h(k)\end{aligned} \tag{17}$$

其中, $u_a(k)$ 和 $u_c(k)$ 是 PID 输出和形变补偿的输出. $u_{ac}(k)$ 是两者之和, 即为第 k 个周期的控制量. $K_h = -\dfrac{nlRT\rho^2 g}{mrP_0^2}$ 是形变补偿系数, $h(k)$ 是机器鱼在 k 时刻的深度采样值. 其增量表达式是

$$\begin{aligned}&\Delta u_{ac}(k) = u_{ac}(k) - u_{ac}(k-1) = \\ &K_p[e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + \\ &K_D[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] + K_h[h(k) - h(k-1)]\end{aligned} \tag{18}$$

3　实验

3.1　原型实现与俯仰实验

按照上述分析和设计, 完成了仿生机器鱼 TPF 样机, 如图 5 所示.

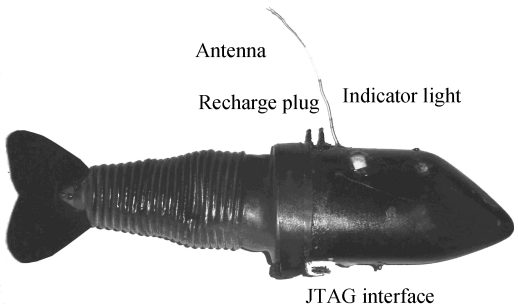

图 5　机器鱼 TPF 样机

Fig. 5　Prototype of the experimental robot fish TPF

实验中使机器鱼从平稳游动的状态切换到某个姿态后的垂直方向上运动达到一定距离, 计算这段距离中机器鱼的平均速度为平均下潜初始速度 (Average descending speed on start, ADSS). 不同 θ 的下潜初始速度如图 6 所示.

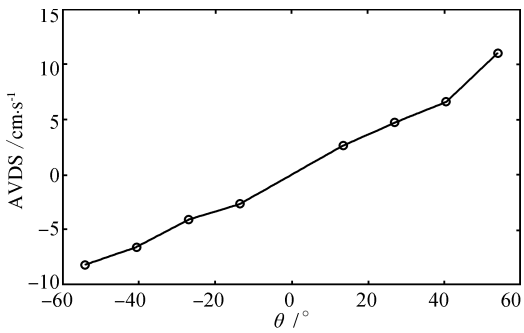

图 6　不同 θ 的下潜初始速度

Fig. 6　θ vs. AVDS

3.2　深度控制实验

将 PID 控制器应用于机器鱼, 并在一个实验水池中进行实验, 机器鱼保持 1.11 Hz 的尾部振动频率, 以保持推进前进, 控制器分别使用 PID 和带形变补偿的 PID 控制深度.

首先使用普通 PID 控制器, 使得机器鱼从水面出发下潜到 30 cm 处. 但是即使仔细调整 PID 的参数也无法使得机器鱼保持在一个稳定准确的深度上, 实验结果如图 7, 平均误差 $E = -18.236$, 方差 $D = 334.693$.

图 8 是带形变补偿的 PID 控制器的结果, 仍然是使得机器鱼从水面出发下潜到 30 cm 处. 实验结果如图 8 所示, $E = 1.8812$, $D = 4.0933$. 响应时间: $T_P = 11.14$ s.

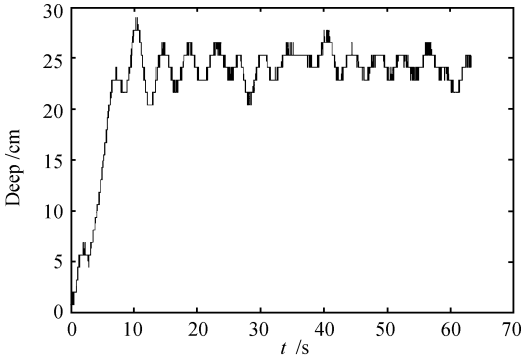

图 7 PID 控制器的结果

Fig. 7 Experimental result of a PID controller

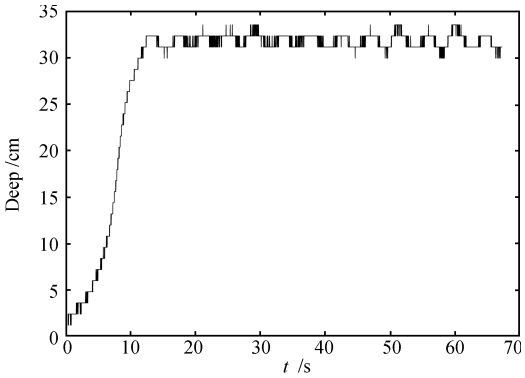

图 8 带补偿的 PID 控制器的结果

Fig. 6 Experimental result of a PID controller with deformation compensation

4 结论

为了实现机器鱼在水中游动时的姿态调节, 并且实现机器鱼的浮潜运动. 设计了重心位置的调节装置, 用于控制机器鱼在水中的姿态, 进一步结合机器鱼多关节的仿生尾部的推进速度, 控制机器鱼深度运动. 分析验证机器鱼尾部摆动规律与推进速度及前进方向的关系; 配重块位置变化和机器鱼重心及其姿态的调整及下潜速度之间的关系. 分析了机器鱼的俯仰姿态和重心的在稳态下的关系, 并且建立了机器鱼深度的运动模型, 给出一个补偿尾部形变的方法和深度控制的方法. 设计了相关实验验证设计的有效性, 实验的数据证明了方案、结构和控制方法的有效性. 进一步工作将致力于提高机器鱼的运动能力, 研究其运动控制方法.

References

1 Marine Science Center. Biomimetic Underwater Robot Program [Online], available: http://www.neurotechnology.neu.edu/, June 1, 2007

2 Kato N, Furushima M. Pectoral fin model for maneuver of underwater vehicles. In: Proceedings of the Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology. New York, USA: IEEE, 1996. 49−56

3 Kato N. Control performance in the horizontal plane of a fish robot with mechanical pectoral fins. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2000, **25**(1): 121−129

4 Fukuda T, Kawamoto A, Arai F, Matsuura H. Mechanism and swimming experiment of micro mobile robot in water. In: Proceedings of IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems. Oiso, Japan: IEEE, 1994. 273−278

5 Liu J D, Hu H S. Building a 3D simulator for autonomous navigation of robotic fishes. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Sendai, Japan: IEEE, 2004. 613−618

6 Liang Jian-Hong, Wang Tian-Miao, Wei Hong-Xing, Tao Wei. Researchful development of underwater robot-fish II-development of a small experiment robot fish. *Robot*, 2002, **24**(3): 234−238
(梁建宏, 王田苗, 魏洪兴, 陶伟. 水下仿生机器鱼的研究进展 II-小型实验机器鱼的研制. 机器人, 2002, **24**(3): 234−238)

7 Yu J Z, Wang S, Tan M. A simplified propulsive model of biomimetic robot fish and its realization. *Robotica*, 2005, **23**(1): 101−107

8 Zhou C, Cao Z Q, Wang S, Tan M. The posture control and 3-D locomotion implementation of biomimetic robot fish. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, China: IEEE, 2006. 5406−5411

9 Hirata K, Sakurai K. Prototype Fish Robot [Online], available http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/fish/experiment/pf550/index_e.html, June 1, 2007

10 Zhou C, Wang L, Cao Z Q, Wang S, Tan M. Design and control of biomimetic robot fish FAC-I. *Bio-mechanisms of Swimming and Flying*. Japan: Springer Japan, 2008. 247−258

11 Boxybot: design and realization of a robotic fish [Online], available http://birg.epfl.ch/page57462.html, June 1, 2007

12 Yamamoto I, Terada Y. Research on flexible oscillating fin propulsion system and robotic fish. In: Proceedings of IFAC Control Applications in Marine Systems. Glasgow, UK: Elsevier, 2001

周 超 中国科学院自动化研究所博士研究生. 主要研究方向为仿生机器鱼设计与运动控制. 本文通信作者.
E-mail: zhouchao@compsys.ia.ac.cn
(**ZHOU Chao** Ph. D. candidate at the Institute of Automation, Chineses Academy of Sciences. His research interest covers design and motion control of biomimetic robot fish. Corresponding author of this paper.)

曹志强 中国科学院自动化研究所副研究员. 主要研究方向为多机器人系统和仿生机器人. E-mail: zqcao@compsys.ia.ac.cn
(**CAO Zhi-Qiang** Associate professor at the Institute of Automation, Chineses Academy of Sciences. His research interest covers multi-robot system and biomimetic robot.)

王 硕 中国科学院自动化研究所副研究员. 主要研究方向为仿生机器人和多机器人系统. E-mail: swang@compsys.ia.ac.cn
(**WANG Shuo** Associate professor at the Institute of Automation, Chineses Academy of Sciences. His research interest covers biomimetic robot and multi-robot system.)

谭 民 中国科学院自动化研究所研究员. 主要研究方向为多机器人系统, 先进机器人和仿生机器人. E-mail: tan@compsys.ia.ac.cn
(**TAN Min** Professor at the Institute of Automation, Chineses Academy of Sciences. His research interest covers multi-robot system, advanced robot, and biomimetic robot.)