

DOI: 10.11992/tis.201604034

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.tp.20170217.0954.006.html>

仿生机器鱼运动学模型优化与实验

王平¹, 许炳招¹, 娄保东², 倪羽洁¹

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 工程训练中心, 江苏 南京 210098)

摘 要:以仿生学为基础的机器鱼是一种新型水下机器人,具有高速、高效、节能等方面优势。为进一步探索仿生机器鱼的运动机理,指出了当前仿生机器鱼运动学模型存在的不足,即未考虑因制造、鱼体结构的影响,而产生的头部左右摆动。故在考虑仿生机器鱼头部摆动的情况下,构建头部摆动方程,引入摆动偏移量,修正其运动学模型。利用 MATLAB 对模型进行优化,分析结果表明修正后的运动学模型更能够描述实体仿生机器鱼的游动特性。最后,将修正后的运动学模型,运用到三关节仿生机器鱼上进行实验,结果表明,该模型能够有效地抑制仿生机器鱼头部摆动,进而提高了仿生机器鱼的游动速度。

关键词:仿生机器鱼;运动学模型;头部摆动;游动速度;转动中心;游动特性;鱼体波;巡游

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2017)02-0196-06

中文引用格式:王平,许炳招,娄保东,等. 仿生机器鱼运动学模型优化与实验[J]. 智能系统学报, 2017, 12(2): 196-201.

英文引用格式:WANG Ping, XU Bingzhao, LOU Baodong, et al. Ptimization and experimentation on the kinematic model of bionic robotic fish[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2017, 12(2): 196-201.

Ptimization and experimentation on the kinematic model of bionic robotic fish

WANG Ping¹, XU Bingzhao¹, LOU Baodong², NI Yujie¹

(1. College of energy and electrical, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Mechanic Skill Training Center, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Bionic robotic fish are a new type of underwater robot with the advantages of high speed, high efficiency, and reductions in energy consumption. To further explore the mechanism used to move these bionic robotic fish, we focus on the present kinematic model and identify defects, e.g., the head sway caused by the manufacturer and inherent fish structure has not yet been considered. Therefore, after considering the head sway of the bionic robotic fish, we establish a head away equation, introduced the sway offset, and revised the kinematic model. Next, we used MATLAB to optimize the model. Our analytic results show that the revised kinematic model more precisely describes the swimming properties of the bionic robotic fish. Finally, we applied our revised kinematic model to experiments involving three-joint bionic robotic fish. Our experimental results show that our model can effectively restrain the head sway of the fish and thereby increase the swimming speed.

Keywords: bionic robotic fish; kinematic model; head sway; swimming speed; rotation center; swimming characteristic; fish body wave; cruise

仿生机器鱼是一种高速、高效、工作时长、工作范围广并能适应多种工况的新型水下机器人,近

年来逐渐成为研究热点,并吸引了众多研究人员从事这方面的研究^[1]。目前对于机器鱼的研究成果主要集中在对机器鱼的控制方法^[2]、机器鱼制作的材料、多鱼协作^[3]以及机械结构等方面^[4]。如改进仿生机器鱼的控制方法,将 CPG 模型运用到仿生机

收稿日期:2016-04-30. 网络出版日期:2017-02-17.

基金项目:国家自然科学基金项目(30700183).

通信作者:许炳招.E-mail: 793631800@qq.com.

器鱼上提高仿生机器鱼游动的精度^[5-7];改进仿生机器鱼路径规划的算法,将现有的陆上机器人的路径规划算法移植到仿生机器鱼上^[8-10];优化仿生机器鱼的尾鳍形状,提高其游动速度^[11]等。然而却鲜有人对仿生机器鱼的运动学模型进行优化,目前鳗科鱼类常用的运动学模型为 Lighthill 提出的细长体理论^[12]。但是该理论是通过提取真实鱼类游动曲线总结而来的,而仿生机器鱼由于制造精度、制作材料、重心配置等多方面的影响结构并不能和真实鱼类完全一致,因此会导致仿生机器鱼在游动的过程中头部也产生一定幅度的摆动。因此本文从仿生机器鱼的运动学模型入手,通过对仿生机器鱼的观察和研究,将仿生机器鱼头部摆动的因素考虑到其运动学模型中对运动学模型进行优化。利用原始运动学模型减去头部摆动方程,并加上转动中心偏移量得到新的运动学模型。最后,将原始模型与新的模型通过实验进行对比,结果表明新的模型能够有效地抑制仿生机器鱼头部摆动。

1 仿生机器鱼物理模型简化与坐标系建立

仿生机器鱼不同的运动模式有各自独立的运动学模型,为了研究仿生机器鱼各个姿态下的游动运动学模型,在进行建模之前有必要先对机器鱼的游动模式进行一个简单的分类。针对鱼类的游动特征将其游动模式分为3个基本的类型,分别为巡游模式、巡游转弯、C-形转弯^[13]。本文主要对其巡游模式进行研究,对其运动学模型进行修正。

仿生机器鱼沿其体干方向,体厚呈对称分布。为了研究仿生机器鱼游动时的运动学模型及其几何关系,以仿生机器鱼体厚方向的对称中心线作为研究对象。当仿生机器鱼稳态游动时,可以将其简化成如图1所示的物理模型。

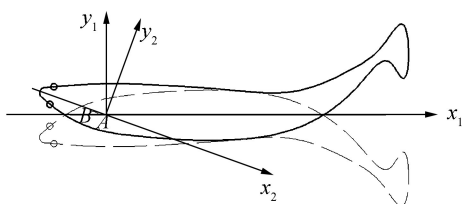


图1 机器鱼简化物理模型

Fig.1 Simplified physical model of robot fish

在该模型中将鱼体简化成无限柔软的二维样条曲线,该曲线与鱼体对称中心线重合。尾鳍简化成刚性的波动板,并绕自身的转轴做旋转运动,且随鱼体做平动运动^[14-15]。头部简化成刚性的直线,与

体样条曲线连接,连接点为鱼体运动波动起点^[16]。取头部与躯干转动部分的连接点A作为坐标原点,建立一个固定坐标系 R_1 。 X 轴的方向始终指向仿生机器鱼的运动方向,鱼尾走向为 X 轴的正方向。同样为了方便后续研究,我们以连接点A作为原点,建立一个随体坐标系 R_2 。该坐标系中 X 轴方向始终指向鱼头方向,鱼头方向为 X 轴的负方向。

2 运动学模型建立与分析

目前,鳗科鱼类所使用的运动学模型大多采用 Lighthill 提出的细长体理论^[12],根据该理论鱼类在 R_1 坐标系中鱼体波为一波幅逐渐增大的行波系类。由一个多项式和正弦曲线合成来近似描述

$$f_B(x, t) = (c_1x + c_2x^2) \cdot \sin(\omega t + kx) \quad (1)$$

式中: $f_B(x, t)$ 为鱼体的横向位移; c_1 为鱼体波波幅包络线的一次项系数; c_2 为鱼体波波幅包络线的二次项系数; k 为鱼体波波数($k = 2\pi/\lambda$, λ 为鱼体波长); ω 为鱼体波频率($\omega = 2\pi f = 2\pi/T$)。

该模型可以用来控制理想鱼体的游动,且鱼头保持游动方向,没有沿中心线两侧的摆动。然而实际上由于仿生机器鱼制造工艺、鱼体比例配置、惯性以及反作用力等各方面影响,仿生机器鱼鱼头并不是保持不动,其在中心线两侧具有小幅度摆动。由惯性和反作用力产生的头部摆动,鱼类可以依靠自身的身体机能主动抑制,但是仿生机器鱼并没有这种机能。因此游动过程中头部摆动是目前仿生机器鱼制造中普遍存在的问题,不可能完全消除,只能尽可能减小其摆动的幅度^[17-18]。其摆动中心根据不同的机器鱼样机身体配比而不同,位置会有细微差别,但一般都分布在头部与尾部运动关节的连接点A点左右两侧。当身体配比理想即头部和尾部运动关节比例与鱼类一致,其转动中心即是A点。当鱼头配比大于尾部运动关节,仿生机器鱼整体重心前移,较大的头部质量会减少仿生机器鱼的头部摆动,转动中心处于A点之前,靠近鱼头;反之转动中心处于A点之后靠近尾部运动关节。由于鱼头摆动的存在,因此式(1)用来描述和控制仿生机器鱼并不能使其很好地模拟鱼类游动。

为了寻找一个更准确的仿生机器鱼游动时的运动学模型,本文以仿生机器鱼原始运动学模型为基础,在考虑鱼头摆动条件下推导出新的运动学模型 $f_T(x, t)$ 。建立新的运动学模型的意义是减小机器鱼的头部摆动,其次是用以控制尾部各个关节在相对坐标系(即 R_2 坐标系)中的运动,因为仿生机器鱼所有关节的运动都是基于头部固定不动始终指向运

动方向而得出的,故其运动都发生在相对坐标系 R_2 中而非固定坐标系 R_1 中。在建立模型之前,先对鱼头进行定义。仿生机器鱼的鱼头是指从机器鱼的鼻尖到尾部运动关节与头部的连接点 A 之间的刚性连接部分。设鱼头转动中心点 B 的坐标为 $(m, 0)$, 则在 R_1 坐标系中鱼头的运动可以用一个随时间变化的线性方程 $f_H(x, t) = ax + b$ 来代替,方程转动中心点为 B , 方程的斜率 a 等于身体波方程 $f_B(x, t)$ 对 x 求偏导,即 $a = \frac{\partial f_B(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=m} = \partial f'_B(x, t) \Big|_{x=m}$ 。需要注意的是原始模型由于转动中心点的偏移,实际的波动起点位于转动中心点 B 处,所以运动学模型也要做相应地变化,用 $f_b(x, t)$ 来表示实际的运动学模型:

$$f_b(x, t) = [c_1(x - m) + c_2(x - m)^2] \cdot \sin[\omega t + k(x - m)] \quad (2)$$

所以仿生机器鱼考虑头部摆动后的运动学模型等于 $f_b(x, t)$ 减去头部摆动方程 $f_H(x, t)$, 即

$$f_T(x, t) = \begin{cases} f_b(x, t) - f_H(x, t), & x \geq m \\ 0, & x < m \end{cases} \quad (3)$$

因为 $a = \partial f'_B(x, t) \Big|_{x=m} = c_1 \sin(\omega t)$, 所以

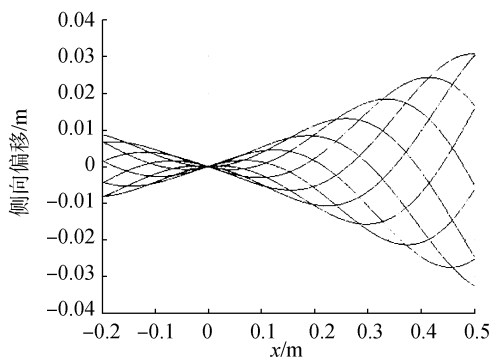
$$f_H(x, t) = c_1 \sin(\omega t)(x - m) \quad (4)$$

将式(2)和式(4)带入式(3)得

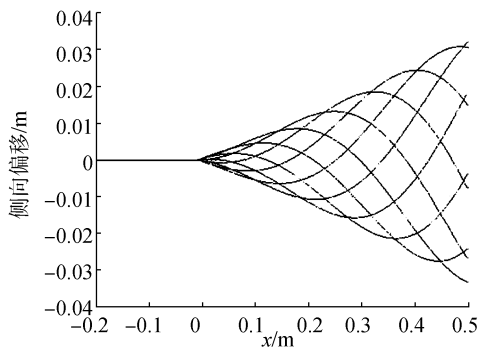
$$f_T(x, t) = [c_1(x - m) + c_2(x - m)^2] \cdot \sin[\omega t + k(x - m)] - c_1 \sin(\omega t)(x - m) \quad (5)$$

c_1, c_2 的取值与仿生机器鱼身体尺寸、运动速度以及机器鱼的运动姿态等因素有关。通过调整波幅包络线 c_1, c_2 的取值可控制仿生机器鱼尾部运动的摆幅,同时其取值对鱼体的身体波波幅也有影响。通过生物学上的研究可知尾部运动关节摆动波幅为 $0.075 \sim 0.1$ 倍体长,鱼体波波长通常取 $\lambda \geq L_B$, 所以鱼体波波数 $k = 2\pi/\lambda = 2\pi/L_B$ [19-20]。本文目前研制出的三关节仿生机器鱼核心部件集中于头部,头部配比较大因此重心偏前,摆动中心应位于连接点之前。利用研制出的仿生机器鱼进行实验,通过实验测得鱼头的摆动中心与理论相一致处于连接点之前,转动中心点 B 的坐标为 $(-0.01, 0)$ 。因此在没有特别说明的情况下,本文所使用的参数均为 $c_1 = 0.05$, $c_2 = 0.03$, $k = 8$, $\omega = -2\pi/9$, $m = -0.01$ 。通过 MATLAB 取相同的参数绘制仿生机器鱼原始运动学模型 $f_B(x, t)$ 的一组曲线簇如图 2(a) 所示,新运动学模型 $f_T(x, t)$ 曲线簇如图 2(b) 所示,图 2(c) 是新的运动学模型曲线汇聚点的放大图。从仿真的曲线图中可以看出新的运动学模型曲线簇波动起点较原始模

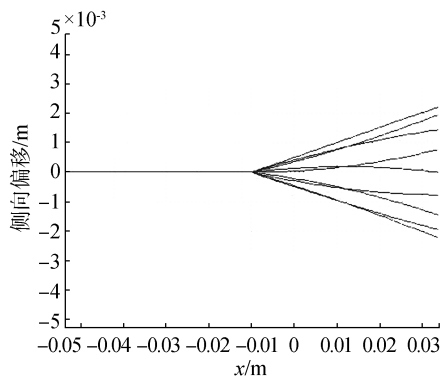
型曲线簇波动起点在零点之前,位于 x 轴负半轴,且波动起点之前的曲线规整为一条直线。这与前文的分析相一致,说明该方程的推导是正确的。



(a) 原始模型



(b) 修正模型



(c) 修正模型汇聚点放大图

图2 仿生机器鱼曲线簇

Fig.2 The curves of robot fish

3 实验与分析

为了进一步比较修正模型与原始模型的区别,我们截选了如图 3(a)、(b)、(c)、(d) 分别为 $t = 1$ 、 $t = 3$ 、 $t = 5$ 和 $t = 7$ 这 4 个时刻的曲线进行对比,可以看出在取相同参数的情况下新的模型把波动起点前的曲线化为一条直线,从波动起点往后看修正模型各个质点的振幅则均比原始模型的振幅大。因此新的模型在形状上更加接近鱼类,且相对于原始模型振幅增大使得游动速度相应地增大。

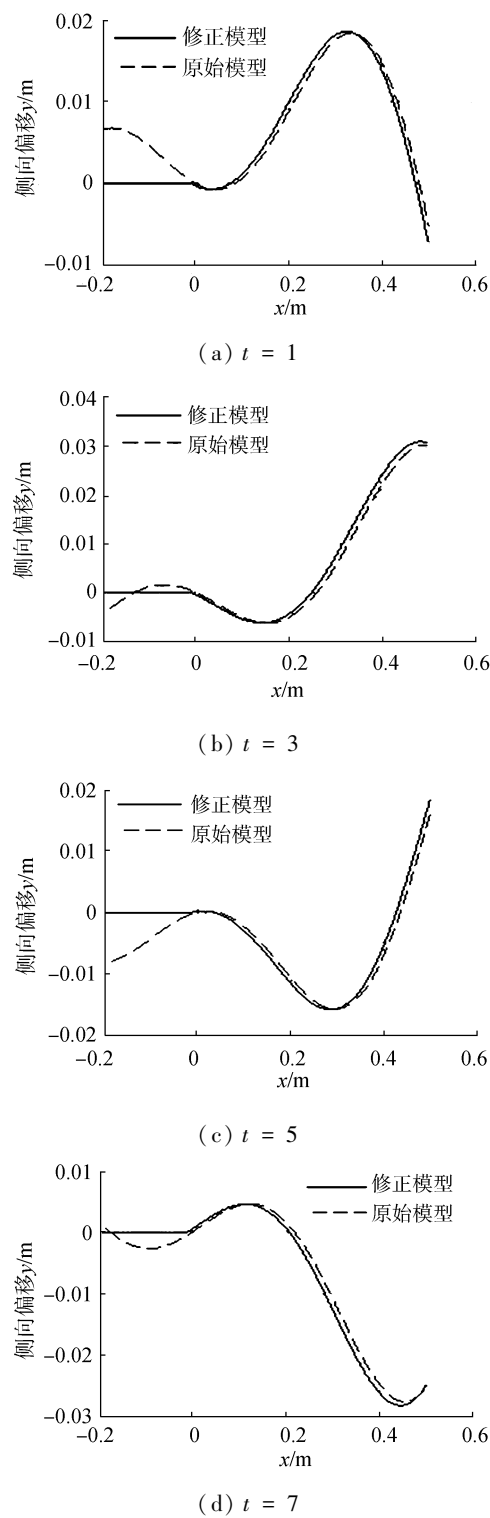


图3 瞬时曲线对比

上述分析在理论上证明了本文所提出的运动学模型的可行性,再将该模型应用到一种三关节仿生机器鱼上进行实验验证。

图 4 是实验用鱼的实物图,该仿生机器鱼由 4 部分组成,分别为:头部,鱼身运动关节 1,鱼身运动关节 2,鱼尾运动关节 3。

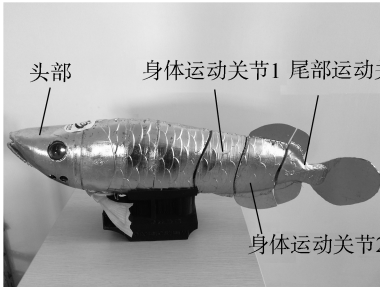
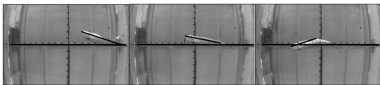


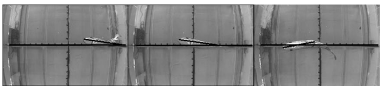
图 4 三关节仿生机器鱼

Fig.4 Three-joint bionic robot fish

将本文提出的运动学模型与原始运动学模型进行实验对比,图 5 是在实验中采集的图片,其中图 (a)为原始模型,图(b)为本文提出的模型,显然新的模型仿生机器鱼头部摆动得到了有效的抑制。从表 1 和图 6 可以看出摆动频率相同的情况下,新模型的头部摆动角度明显小于原始模型的头部摆动角度。在不同的频率下,频率越大头部摆动角度也变大,且最大摆动角度缩小到原来的 86%。表 2 和图 7 是在摆动频率相同的情况下,测量机器鱼游动相同距离所需要的时间,可以看出新的模型游动相同的距离所用的时间明显小于原始模型的运动时间。通过计算可以得到两种方程在摆动频率相同的情况下的速度,新模型的计算速度相对原始模型的计算速度提高了 17%。因此实验证明新模型能够有效提高机器鱼的游动速度。



(a) 原始模型实验实拍图



(b) 新模型实验实拍图

图 5 仿生机器鱼运动控制实验

Fig.5 Motion control experiment of bionic robot fish

表 1 三关节仿生机器鱼头部摆动角度实验

Table 1 Head swing angle experiment of three joint bionic robotfish

实验次数	原始模型		修正模型	
	摆动频率/Hz	头部最大摆动角度/(°)	摆动频率/Hz	头部最大摆动角度/(°)
1	1	12	1	10
2	0.9	12	0.9	10
3	0.8	11	0.8	10
4	0.7	10	0.7	9
5	0.6	9	0.6	8
6	0.5	9	0.5	7

表 2 三关节仿生机器鱼速度实验

实验 次数	原始模型			修正模型		
	游动 距离 l/m	实际使用 时间 t/s	计算速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	游动 距离 l/m	实际使用 时间 t/s	计算速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1	2.0	3.40	0.59	2.0	2.80	0.71
2	1.8	3.02	0.60	1.8	2.55	0.71
3	1.6	2.60	0.61	1.6	2.30	0.69
4	1.4	2.35	0.60	1.4	2.01	0.70
5	1.2	2.03	0.59	1.2	1.75	069
6	1.0	1.70	0.59	1.0	1.50	0.67

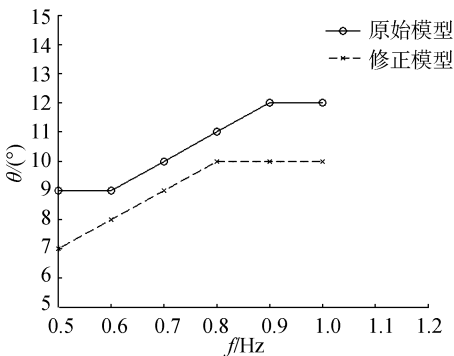


图 6 头部摆动实验曲线对比

Fig.6 Comparison of head swing experiment curve

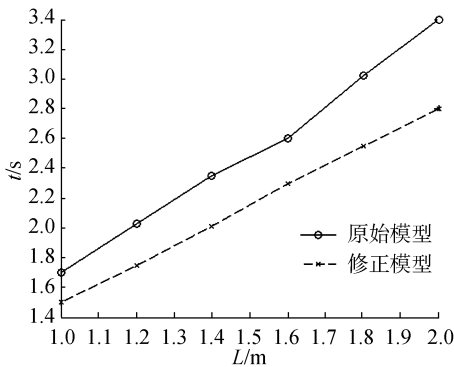


图 7 速度实验曲线对比

Fig.7 Comparison of speed experiment curve

4 结论

本文通过对仿生机器鱼的运动学模型进行研究,并对研究结果进行实验验证,得出以下结论:

1)通过对仿生机器鱼运动学模型的分析,将实际仿生机器鱼游动时头部的摆动因素考虑到运动模型当中,对仿生机器鱼的原始模型进行优化,使得运动学模型能够更加准确地描述仿生机器鱼的游动。

2)通过引入头部摆动方程和摆动中心偏移量,对当前的运动学模型进行了优化,使优化后的模型集中体现仿生机器鱼的尾部运动,削弱了头部与尾

部的关联性,从而有效抑制其头部的摆动。通过实验将运动学模型应用到三关节仿生机器鱼上,结果验证了上述理论分析仿生机器鱼头部最大摆动角度减少到原来的 86%。而随着仿生机器鱼头部摆动程度的减少,其对仿生机器鱼周边流体的阻力减小,仿生机器鱼游动流畅性增加,因此在摆动频率相同的情况下实验测得仿生机器鱼的速度提高 17%。

参考文献:

[1] 张志刚, 喻俊志, 王硕, 等. 多关节仿鱼运动推进机构的设计与实现[J]. 中国造船, 2005, 46(1): 22-28.
ZHANG Zhigang, YU Junzhi, WANG Shuo, et al. Design and realization of fish-like machine propelled with multi links [J]. Shipbuilding of China, 2005, 46(1): 22-28.

[2] 王耀威, 纪志坚, 翟海川. 仿生机器鱼运动控制方法综述[J]. 智能系统学报, 2014, 9(3): 276-284.
WANG Yaowei, JI Zhijian, ZHAI Haichuan. A survey on motion control of the biomimetic robotic fish [J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2014, 9(3): 276-284.

[3] 单素素, 纪志坚, 翟海川. 采用 Leader-follower 和模糊反馈机制的机器鱼队形控制[J]. 智能系统学报, 2013, 8(3): 247-253.
SHAN Susu, JI Zhijian, ZHAI Haichuan. The formation control of multi-robot fish based on leader-follower and fuzzy feedback mechanism [J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2013, 8(3): 247-253.

[4] YU Junzhi, WANG Shuo, TAN Min. A simplified propulsive model of bio-mimetic robot fish and its realization[J]. Robotica, 2005, 23(1): 101-107.

[5] LI Liang, WANG Chen, XIE Guangming. Modeling of a carangiform-like robotic fish for both forward and backward swimming: based on the fixed point[C]//Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Hong Kong, China: IEEE, 2014: 800-805.

[6] 刘安全, 李亮, 罗文广, 等. 一种面向机器鱼的高精度位

- 姿控制算法设计与实现[J]. 机器人, 2016, 38(2): 241-247.
- LIU Anquan, LI Liang, LUO Wenguang, et al. Design and implementation of a high precision posture control algorithm for robotic fish[J]. Robot, 2016, 38(2): 241-247.
- [7] LI Liang, WANG Chen, XIE Guangming. A general CPG network and its implementation on the microcontroller[J]. Neurocomputing, 2015, 167: 299-305.
- [8] 李连鹏, 苏中, 解迎刚, 等. 基于遗传算法的机器鱼水中路径规划[J]. 兵工自动化, 2015, 34(12): 93-96.
- LI Lianpeng, SU Zhong, XIE Yinggang, et al. Path planning of robot fish's based on genetic algorithm[J]. Ordnance industry automation, 2015, 34(12): 93-96.
- [9] 葛立明, 李宗刚. 尾鳍推进仿生机器鱼速度优化[J]. 兰州交通大学学报, 2016, 35(3): 18-23.
- GE Liming, LI Zonggang. The speed optimization of robotic fish propelled by caudal fin[J]. Journal of Lanzhou jiaotong university, 2016, 35(3): 18-23.
- [10] LIU Jindong, HU Huosheng. Biological inspiration: from carangiform fish to multi-joint robotic fish[J]. Journal of bionic engineering, 2010, 7(1): 35-48.
- [11] KATO N. Control performance in the horizontal plane of a fish robot with mechanical pectoral fins[J]. IEEE journal of oceanic engineering, 2000, 25(1): 121-129.
- [12] STREITLIEN K, TRIANTAFYLLOU G S, TRIANTAFYLLOU M S. Efficient foil propulsion through vortex control[J]. AIAA journal, 1996, 34(11): 2315-2319.
- [13] National Maritime Research Institute. Welcome to fish robot home page[EB/OL]. [2000-09-01]. <http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/fish/>.
- [14] 林海, 薛志斌, 张倩. 四关节仿生机器鱼的运动曲线分析[J]. 机械研究与应用, 2015, 28(4): 97-98, 101.
- LIN Hai, XUE Zhibin, ZHANG Qian. Analysis of movement curve of the four-joint robotic fish[J]. Mechanical research & application, 2015, 28(4): 97-98, 101.
- [15] 喻俊志, 陈尔奎, 王硕, 等. 仿生机器鱼基本运动控制算法的研究[C]//第二届自动化与信息技术发展战略研讨会论文集. 北京: 中国自动化学会, 2002: 152-157.
- [16] 魏清平, 王硕, 谭民, 等. 仿生机器鱼研究的进展与分析[J]. 系统科学与数学, 2012, 32(10): 1274-1286.
- WEI Qingping, WANG Shuo, TAN Min, et al. Research development and analysis of biomimetic robotic fish[J]. Journal of systems science & mathematical sciences, 2012, 32(10): 1274-1286.
- [17] 曾妮, 杭观荣, 曹国辉, 等. 仿生水下机器人研究现状及其发展趋势[J]. 机械工程师, 2006(4): 18-21.
- ZENG Ni, HANG Guanrong, CAO Guohui, et al. Present state and tendency of bionic underwater robot[J]. Mechanical engineer, 2006(4): 18-21.
- [18] 刘军考, 陈在礼, 陈维山, 等. 水下机器人新型仿鱼鳍推进器[J]. 机器人, 2000, 22(5): 427-432.
- LIU Junkao, CHEN Zaili, CHEN Weishan, et al. A new type of underwater turbine imitating fish-fin for underwater robot[J]. Robot, 2000, 22(5): 427-432.
- [19] 杜家纬. 生命科学与仿生学[J]. 生命科学, 2004, 16(5): 317-323.
- DU Jiawei. Life science and bionics[J]. Chinese bulletin of life sciences, 2004, 16(5): 317-323.
- [20] 夏全新, 鲁传敬, 吴磊. 鱼类波状摆动推进的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2005, 20(S): 921-928.
- XIA Quanxin, LU Chuanjing, WU Lei. Numerical simulation about fish undulating advancing[J]. Journal of hydrodynamics, 2005, 20(S): 921-928.

作者简介:



王平,男,1962年生,副教授,主要研究方向为智能控制理论及应用、电力系统自动化技术、水电站控制与仿真技术。发表学术论文20余篇。



许炳招,男,1991年生,硕士研究生,主要研究方向为机器人系统控制及定位。



姜保东,男,1963年生,高级工程师,主要研究方向为机器人设计与控制、智能控制系统、波浪发电应用研究、水下水工建筑物的损伤探测研究。