

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.11.020

半圆形尾鳍机器鱼在水球竞赛中的点到点路径规划算法

陈远志, 李卫京

(陆军航空兵学院 机械工程系, 北京 101123)

摘要: 为增强机器鱼在比赛中的机动性和顶球的高效性, 对机器鱼尾鳍形状进行改装, 并对 2 种点到点路径规划算法进行分析。在实验观察基础上, 借鉴对鱼类运动机理研究的成果, 将机器鱼的尾鳍形状由半月形改变成半圆形, 增大了机器鱼的推进能力。结合水球比赛不同项目的要求和特点, 以及机器鱼尾鳍形状改装后运动性能的变化情况, 从理论上给出 2 种点到点路径的设计思路, 并针对比赛中存在的实际问题提出了解决办法。根据实际需求, 可在单鱼顶球的比赛中选用齿轮法, 而在单鱼或多鱼对抗中, 则可选用角度修正法。

关键词: 机器鱼; 半圆形尾鳍; 水球竞赛; 策略

中图分类号: TP242; TP301.6 **文献标识码:** A

Point-to-Point Strategy in Polo Competition for Robot Fish with Hemicycle Tale Fin

Chen Yuanzhi, Li Weijing

(Dept. of Mechanical Engineering, Army Aviation Institute, Beijing 101123, China)

Abstract: In order to increase the flexibility and efficiency of robot fish in competitions, refit tale fin and analyze two point-to-point strategy. Based on the experiments and researches on the movement of robot fish, the robot fish could be speeded up by refitting the shape of tale fin from lune to hemicycle. Combined with the different requirements and characteristics of different items of robotic fish water polo game and the performance after refitting, two point-to-point track strategy are given, and the resolution is also given for the problems in game. According to requirements, use gear method in ball-pushing competition and adopt angle amending method in single fish or multi-fish countermine.

Keywords: robot fish; hemicycle tale fin; polo competition; strategy

0 引言

作为自然界最早出现的脊椎动物, 鱼类经过亿万年的自然选择, 进化出了非凡的水中运动能力, 既可以在持久游速下保持低能耗高效率, 也可以在爆发游速下实现高机动性, 多种鱼类具有众多独特的游动方式^[1], 这是目前任何传统水下设备所无法比拟的。通过分析鱼类运动机理, 建立其运动学模型, 为机器鱼的设计与控制提供了依据^[2-4]。纵观国内外对仿生机器鱼的研究状况可知^[5-6], 目前, 美国和日本在该领域的研究处于领先地位, 取得的成果也比较多。而中国对机器鱼的研究仍存在一些突出问题^[7], 需要深化项目研究, 综合多样技术, 创新实验方法^[8-10], 尽快缩短与其他国家的研究差距。在机器鱼水球比赛中, 机器鱼的推进能力决定着其机动性, 而运动路径算法则决定了顶球的高效性, 故从机器鱼的推进能力和运动路径算法 2 方面进行探索, 以增强机器鱼在比赛中的竞争力。

1 机器鱼水球比赛的意义和内容

水中机器人比赛涉及机器人足球、水动力分析、

水下通讯、图像处理、抗干扰等多方面的内容, 难度大, 技术复杂, 对机器人领域的研究具有重要的推动作用。竞赛环境如图 1, 具体的竞赛软硬件要求以及竞赛规可参看文献[11]。

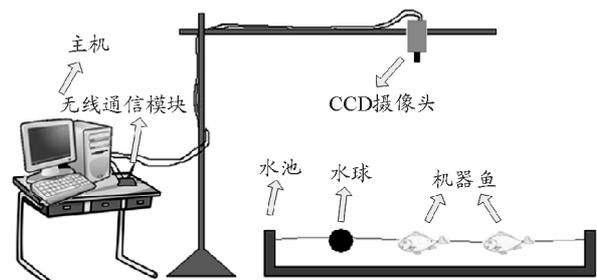


图 1 机器人水球比赛示意图

2 机器鱼的组成及运动特点

仿生机器鱼 (Bio-Mimetic Robot Fish) 是参照鱼类游动的推进机理, 利用机械电子元器件或智能材料来实现水下推进的一种运动装置。

2.1 机器鱼的组成

机器鱼由控制单元、通讯单元、驱动单元、支撑单元和附件等组成, 如图 2。

收稿日期: 2010-05-24; 修回日期: 2010-06-12

作者简介: 陈远志 (1985-), 男, 广东人, 陆军航空兵学院机械工程系本科生。

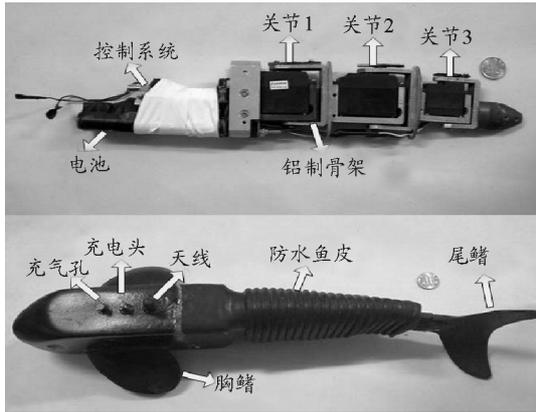


图 2 仿生机器鱼的机械结构

2.2 运动机理简述

鱼类是通过尾鳍的摆动产生推力的, 由于鱼类处于一个复杂的流场环境中, 运用当前的流体力学理论还难以准确地建立其水动力模型。

鱼类之所以能实现高效率的推进, 是来自尾鳍整合背后涡流的能力。这些涡流的强度随着尾鳍的力量而增加, 其旋转轴方向一直都垂直于鱼前进的方向, 使得形成有效推力的喷流平行于鱼前进的方向。当尾鳍向一侧摆动时, 会使附近的水流产生一个诱导速度, 带动水流随尾鳍运动, 经过的区域则形成一个低压区, 吸引附近各个方向的来流, 于是形成一个大涡流; 当尾鳍摆过一定的角度后, 迅速往反方向回摆, 快速的顶端摆动造成一个相反方向的涡流, 尾鳍回摆之后使得两个涡流相遇, 相并的两个涡流形成一柱强力的向后喷流, 并相互减弱涡流强度, 将能量转变成鱼体向前的动能, 如图 3。

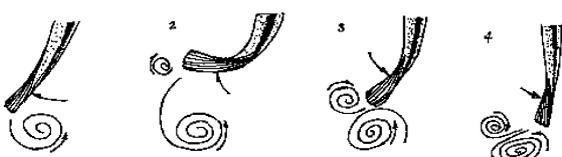


图 3 尾鳍产生推力的原理示意图^[12]

2.3 机器鱼尾鳍形状的选取

中国科技大学的童秉纲等曾分析过鱼类的机动运动机理、鱼类转弯的尾部控制理论^[12-13]。总体上讲, 鱼类的高效推进与一些因素有关, 如尾鳍的划水面积、形状等, 并且尾鳍的大小应该与身体体积成一定的比例。

2.3.1 机器鱼尾鳍改装前后的运动比较

通过金枪鱼、海豚、白鲸尾鳍水动力性能比较实验, 尾鳍的形状对推进效率有影响, 结果表明月牙形尾鳍的推进效率较高^[14]。因此, 机器鱼的尾鳍

一般采用月牙形, 在电池输出功率相同的前提下, 推进效率高意味着游动速度快。而在实践中, 对机器鱼的尾鳍进行改装, 将月牙状缺口封堵平整成近似半圆形, 如图 4。通过实验观察, 改装尾鳍后的机器鱼, 其游动速度约为改装前的 1.2 倍; 而且转弯的角速度也显得更快。

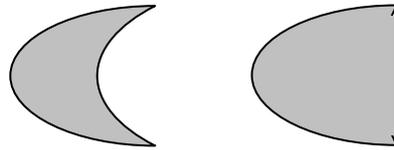


图 4 月牙形尾鳍与半圆形尾鳍示意图

2.3.2 运动性能改变的原因分析

对尾鳍改装前后的运动性能的变化, 笔者认为有以下几点原因:

- 1) 上文引用的尾鳍形状对水动力影响的比较实验, 是以高速游动的鱼类为研究对象的, 而现有的机器鱼仅能做低速游动。
- 2) 与一般鱼类不同, 现有机器鱼只漂浮在水面, 部分尾鳍一直露在水面上, 真正的作用面并没有覆盖尾鳍的全部面积。
- 3) 在尾鳍大小与身体体积成一定比例范围内, 尾鳍产生推力的大小与划水的面积成正比, 当尾鳍由月牙形改装成半圆形时, 尾鳍作用面积已增大, 所以尾鳍形状导致的推进效率差异可以忽略。
- 4) 在增大划水面积的同时, 尾鳍与水接触的边界也缩短了, 有利于尾鳍划水时减少边界损失。

由于机器鱼水球比赛的对抗性比较强, 更好的机动性能是取胜的关键条件之一, 所以选用半圆形尾鳍的机器鱼作为研究对象。

2.4 机器鱼的运动特点

从实验观察发现, 机器鱼游动时, 全身的轨迹形成鱼体波 (如图 5):

$$y_{body}(x,t)=[(c_1x+c_2x^2)][\sin(kx+\omega t)] \quad (1)$$

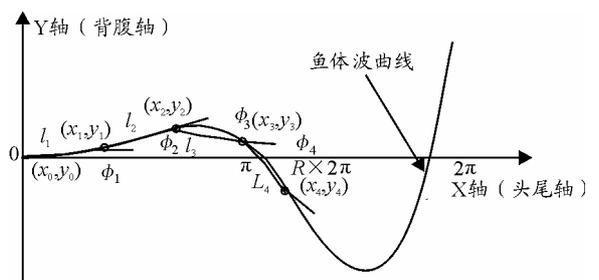


图 5 鱼体波函数及曲线

式 (1) 中, y_{body} 是鱼体的横向位移 (背腹鳍),

x 是鱼体轴向位移(头尾轴), k 是波长倍数($k=2\pi/\lambda$), λ 是鱼体波的波长, C_1 是鱼体波波幅包络线的一次项系数, C_2 是鱼体波波幅包络线的二次项系数, ω 是鱼体波频率 ($\omega=2\pi/T$)。

鱼只向前运动而不会后退, 只能以不同的转弯模式来改变前进方向, 朝前进方向划一段圆弧。为便于建立路径分析模型, 把机器鱼的运动轨迹用一些理想的曲线表示, 即把鱼在不同的方向档位和速度档位搭配时游动的轨迹看作半径为 R (单位为像素) 的圆, 记顺时针转动时, R 为正值; 逆时针转动时, R 为负值。经实验测量, 其对应关系见表 1。

表 1 运动档位与轨迹半径参考对照

S	D						
	7	6	5	4	3	2	1
15	∞	-216	-143	-90	-63	-41	-28
14	∞	-208	-132	-88	-56	-38	-24
13	∞	-202	-128	-87	-52	-37	-22
12	∞	-201	-123	-82	-50	-35	-20
11	∞	-198	-121	-78	-48	-34	-18

注: 1、D 表示方向档位; S 表示速度档位

2、 ∞ 表示半径无穷大, 即为直线

3 机器鱼点到点运动规划算法

3.1 齿轮传动法

3.1.1 最终位姿的确定

因为机器鱼的任务是将球顶入进攻球门, 要求机器鱼顶球的方向基本指向球门, 击球点位于球心与球门线中点的连线与球壁的交点 H 处, 其位置由式 (2) 确定:

$$\begin{cases} X_H = X_b - R_b \cos \theta \\ Y_H = Y_b - R_b \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

其中, 球心坐标为 (X_b, Y_b) , 半径为 R_b , θ 是球心到球门中点射线的方向角。

为方便讨论, 假设将鱼看成没有宽度和厚度的有向线段, 不受水波的干扰, 严格沿圆形或直线轨道移动。机器鱼的基本击球方式有 3 种: 头部刚体部分的正顶、侧顶和尾部柔性部分的撞击。由于用柔性部分击球时难以控制击球点, 并且机器鱼击球完毕后, 球的运动和鱼的运动朝相互距离增大的方向发展, 不利于在短时间进行二次击球, 所以该方式一般仅在临门一脚时使用。因此最终位姿有 3 种选择, 如图 6。

第一种: 鱼心位于 $F1$, 方向角 α 为 θ ;

第二种: 鱼心位于 $F2$, 方向角 α 为 $\theta+90$;

第三种: 鱼心位于 $F3$, 方向角 α 为 $\theta-90$ 。

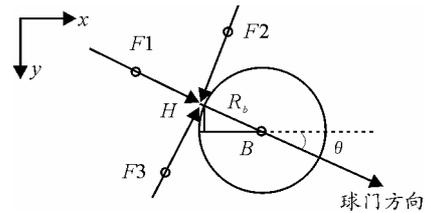


图 6 击球点和最终位姿示意图

由击球点 H 反向延长射线 HB , 长度为 l_{tx} , 即鱼头最前端至鱼心的长度, 便可定位于 $F1$ 点。再由方程组 (3), 求解可得 $F2$ 和 $F3$ 的坐标。

$$\begin{cases} (x - X_H)^2 + (y - Y_H)^2 = l_{tx}^2 \\ y - Y_H = \tan(\theta + 90^\circ)(x - X_H) \end{cases} \quad (3)$$

3.1.2 齿轮模型的设想

根据齿轮系传动的模型, 直径不同的齿轮相互啮合, 接触的 2 个齿轮沿相反方向转动, 可实现动能的传输。设想鱼的轨迹是直线和圆, 在其游动过程中, 方向和速度档位连续发生变化, 相当于鱼的路径从一个圆形轨道经切点进入另一个相切的圆形轨道内, 经过若干次变轨道后, 如同啮合齿轮系进行动能传递一样, 最终到达预定的目标点, 如图 7。

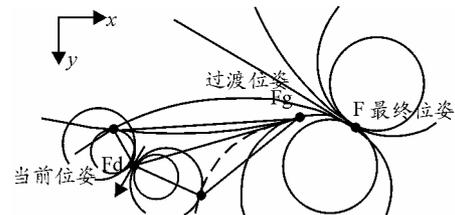


图 7 齿轮法模型的变轨路径

3.1.3 齿轮法运动轨迹模型的建立

齿轮法设计流程如图 8。

1) 逆向寻找轨道

当机器鱼到达目标点时, 设鱼中心点为 $F(X_f, Y_f)$, 鱼的方向角为 α 。可推测鱼沿若干条路径进入最终姿态。沿鱼瞬时前进方向的逆向, 可引出一条直线和与该直线相切的若干条半径不等的圆弧, 每一条曲线均可作为鱼进入最终姿态的上一时刻的路径。已知各轨道的半径, 切线方程和切点坐标, 使用式 (3) 可求解 $F2$ 和 $F3$, 同样可得到轨道圆心的坐标。

2) 判断过渡位姿

若当前的鱼心坐标是某条轨迹方程的解, 则认为鱼在轨迹上, 再判断鱼头前进方向与轨迹的旋向是否相同, 若相同, 则表示鱼可沿该轨迹进入最终姿态, 否则, 认为鱼处于轨迹间隙。此时, 要求鱼先要进入过渡位姿, 再沿正确轨迹进入最终位姿。从

上述轨迹圆中选取靠近当前鱼心点且半径较小的圆, 过鱼心点作该圆的切线, 则切点为过渡位姿的鱼心点, 方向为在圆上运行的瞬时速度方向。

3) 比较最短路径

在确定了过渡姿态后, 若当前鱼头方向与过渡姿态的一致, 则可前游进入。否则从过渡姿态向后引出全部轨迹, 从当前状态引出全部前进轨迹, 找出所有相切, 并且是旋向无冲突(外切则旋向相反, 内切则旋向相同)的组合, 再比较从当前点到切点再到过渡姿态点的距离之和, 以距离最短的路径为选用的轨迹。由于圆与圆之间不一定正好相切, 并且由于识别偏差及鱼体宽度等因素, 所以除真正的切点外, 当两圆相交的交点间距离小于一定的像素值时, 仍看作两圆相切, 切点为两交点连线的中点。

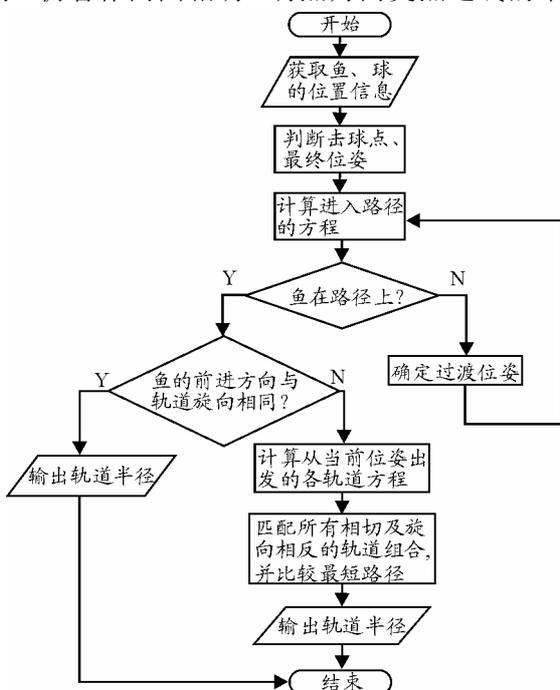


图 8 齿轮法路径设计流程图

3.2 角度修正法

角度修正法仅确定最终的目标点, 而不关注机器鱼到达目标点时的方向, 通过不断修正前行方向与鱼心指向目标点的方向偏移角, 确保鱼始终朝向目标点游动。如图 9, 若目标点为 $D(X_D, Y_D)$, 鱼心实时的坐标为 (X_f, Y_f) , 机器鱼头的方向角为 α , 从机器鱼心向目标点引一射线, 射线的方向角为 β , 机器鱼与目标点间的距离为 t , 则目标点相对鱼前进方向的角度为:

$$\gamma = \beta - \alpha \quad (-180^\circ \leq \gamma < 180^\circ) \quad (4)$$

根据 γ 的大小和 t 所处的范围选用对应的方向档位, 以调整前进方向指向目标点。该范围的划分

及其对应档位的选用应以机器鱼实际的转弯能力为根据。而且, 该对应关系还要视机器鱼和目标点的距离范围作微小调整, 从而避免靠近击球点时, 出现鱼“拐不过弯”而导致击球点偏差大的现象。

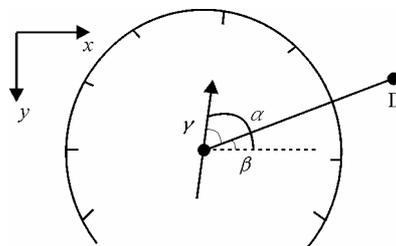


图 9 角度修正示意图

3.3 2 种算法的对比和选用原则

综上所述, 齿轮法考虑了最终位姿, 所以顶球的方向较稳定, 但鱼需要绕的曲线距离较长; 角度修正法以快速到达目标点为目的, 尽管方向多变, 但保证了及时到位。在单鱼顶球的比赛中, 水池中的水波策动源只有一条机器鱼, 并且水球的运动轨迹不会因存在其它机器鱼而发生突变, 首要原则是稳定水球运行的轨迹, 可选用齿轮法。

在单鱼或多鱼对抗中, 水池中的流场环境复杂, 争夺十分激烈, 能单独长时间控球的机会很少, 攻防角色转换很快, 进行路线预测的难度较大, 而及时破坏对方的控球, 并尽量将球压制在对方半场内会大大增加进球的概率, 对抗中的首要原则是向目标点快速机动, 宜选用角度修正法。

4 实际运用中存在的问题及解决方法

由于上述算法模型是在理想状态下建立的, 要将其运用到比赛中去, 必须考虑外界的影响因素, 主要包括:

1) 水波的推动影响

当水池中有多条机器鱼游动时, 能量就从多个策动源传入到水池中, 造成流场中有方向不同的多股水流流向鱼的身体, 机器鱼的质量较小, 则惯性也较小, 在浮力和水波的共同作用下, 很容易偏离原来理想的运动轨道。

图 10 是跟踪机器鱼转弯游动的轨迹, 图 10(a) 是在水面平静时开始游动, 图 10(b) 是在外力搅动水体时游动。从实验曲线看出, 水面较平静时, 鱼的轨迹基本为圆形, 但每一圈之间不能完全重合, 此时的活动范围实际上是一个圆环区域; 在有外界较大扰动的情况下, 轨迹呈偏移的圆系, 偏移方向与作用在鱼体上的主要扰动来流速度方向基本相同。

(下转第 78 页)

2007(23): 107-108.

[7] 黄菲. 基于遗传算法的图像分割[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2008.

[8] 姜贺. 基于几何特征的人脸识别算法的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.

[9] 李敬. 增量学习及其在图像识别中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.

[10] Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods. 数字图像处理(第 2 版)[M]. 阮秋琦, 阮宇智, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2007: 70-474.

[11] 尹聪. 真彩色细胞显微图像自动识别技术的研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.

[12] 张广超. 动态图像的自动跟踪和识别技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2008.

[13] 何俊. 遗传算法在阈值分割中的应用研究[D]. 广州: 华南师范大学, 2008.

[14] 王江涛. 基于视频的目标检测、跟踪及其行为识别研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

[15] 姚辉. 移动目标视频跟踪关键技术的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.

(上接第 69 页)



图 10 外界干扰对游动轨迹的影响比较

在运用齿轮法时, 判断点是否在圆上, 可以转换为判断点是否在一个微小宽度的圆环内。另一方面, 为了在对抗中争得顶球的先机, 可加入对球移动速度的考虑, 预测鱼与球的相遇点, 实施预判断。这需要借助图像识别的分辨能力进一步提高, 以及浅水波仿真模型的进一步完善。

2) 障碍物的阻挡

避障规划是提升机器鱼智能程度的关键环节。在水球比赛中, 遇到的障碍主要有 2 种: 一种是对方的机器鱼, 另一种就是向己方球门游动时, 处于向球门游动路线上的水球。若不能妥善解决第二种情况, 则造成的危害性极大。

在运用齿轮法时, 加入球的瞬时速度, 根据该参数推算球的可能运行路径曲线方程, 看它是否与所选定的路径有交点, 是否会同时到达交点处。而在用角度修正法时, 可灵活规划避障路径, 即机器鱼在向己方球门游动时, 若球处于前进方向不远处, 则将目标点临时改在球的旁边, 待避过球后, 再还原原来的目标点。

3) 图像识别的偏差

光线的变化使摄像头获取的目标颜色发生变化, 当颜色的 HLS 值与原来的设定不符合时, 则系统无法识别目标, 失去了定位能力, 发送的指令也与实际情况不相符。

4) 通讯延时和机械反映滞后产生的时间差

通讯信号的收发以及指令到达鱼内的控制单元后, 指挥电机按要求转动, 这一过程需要耗费一定的时间。虽然绝对时间很短, 但在运动过程中需要

改变动作的最佳时机转瞬即逝, 导致相对延迟时间还是较长。

5 总结

将机器鱼尾鳍形状由半月形改变成半圆形, 设计了 2 种点到点路径规划算法, 并从理论上进行描述和比较。由于在实际比赛过程中还存在一些干扰因素, 下一步, 将在硬件水平进一步提升的情况下进一步优化算法, 以达到理想的效果。

参考文献:

[1] 徐新生, 孙发明. 自然界鱼类游动的力学现象与丰富多彩的仿生鱼设计[J]. 力学与实践, 2009, 31(3): 109-114.

[2] 李近, 许成锋. 机器鱼运动建模[J]. 九江学院学报, 2009(3): 57-59.

[3] 聂林, 等. ICPF 驱动的微型机器鱼游速的影响因素分析[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(3): 289-292.

[4] 夏丹, 等. 基于 Kane 方法的仿鱼机器人波状游动的动力学建模[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6): 41-49.

[5] 曾妮, 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): 18-20.

[6] 喻俊志, 等. 仿生机器鱼研究的进展与分析[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(4): 485-490.

[7] 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[J]. 机器人技术与应用, 2003(3): 14-19.

[8] 梁建宏, 等. 水下仿生机器鱼的研究进展 III—水动力学实验研究[J]. 机器人, 2002, 24(4): 304-308.

[9] 刘军考, 陈维山, 陈在礼. 仿生机器鱼的运动学参数及实验研究[J]. 中国机械工程师, 2002, 13(16): 1354-1356.

[10] 于凯, 黄胜, 王超. 一种新型的仿生双尾推进器模型实验[J]. 实验流体力学, 2008, 22(1): 27-30.

[11] 中国自动化学会机器人竞赛工作委员会. 2010 中国水中机器人竞赛规则[S]. 北京: 北京大学, 2010.

[12] 俞经虎. 仿生机器鱼运动分析研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2004.

[13] 胡文蓉, 童秉纲, 马晖扬. 鱼类机动运动机理初探[C]//空气动力学前沿研究论文集, 2003: 228-236.

[14] 成巍, 苏玉民, 秦再白, 等. 柔性仿金枪鱼月牙形尾鳍水动力分析[J]. 海洋工程, 2004, 22(4): 73-79.