

仿生机器鱼 S 形起动的控制与实现

吴正兴¹ 喻俊志¹ 苏宗帅¹ 谭民¹

摘要 给出一种仿生机器鱼 S 形起动的控制方法. 结合北美狗鱼 S 形起动的形态特征及水动力学知识, 建立了多关节链式结构仿生机器鱼的 S 形起动模型. 整个过程设计为两个阶段: 1) 弯曲阶段: 以转向速度最大化为目标. 在鱼体 S 形变保证重心稳定平移的前提下, 增大较长转向力臂处的转向力矩, 提高转向速度, 使鱼体迅速转向目标方向. 2) 伸展阶段: 以增大前推力为目标. 始终保持部分将要伸展的鱼体垂直前进方向, 以 L 形滑动方式打开鱼体. 同时, 为保证转向精度, 采用模糊控制调节已展开鱼体关节的小角度转动, 实时纠正鱼体展开所引起的游动方向偏离. 在 S 形起动末期, 采用变幅值-频率的中枢模式发生器 (Central pattern generator, CPG) 实现向稳态游动方式的过渡: 前期为保证游动方向及获取较大推进力, 采用小幅度-高频率的 CPG 信号, 后期则进入大幅度-低频率的稳态游动. 最终, 采用四关节仿生机器鱼验证了该方法的有效性, 实现了峰值转速为 $318.08 \pm 9.20^\circ/\text{s}$ 、转向误差为 $1.03 \pm 0.48^\circ$ 的较好结果, 对提升水下游动机器人的机动性能具有指导意义.

关键词 仿生机器鱼, 快速起动, S 形起动, 转向运动

引用格式 吴正兴, 喻俊志, 苏宗帅, 谭民. 仿生机器鱼 S 形起动的控制与实现. 自动化学报, 2013, 39(11): 1914–1922

DOI 10.3724/SP.J.1004.2013.01914

Control and Implementation of S-start for a Multijoint Biomimetic Robotic Fish

WU Zheng-Xing¹ YU Jun-Zhi¹ SU Zong-Shuai¹ TAN Min¹

Abstract This paper is devoted to the S-start maneuvers for a biomimetic robotic fish using the body and/or caudal fin (BCF) mode. Considering the morphological characteristics of *Esox masquinongy* in S-start and basic principles on fluid dynamics, an S-start control method for a multijoint robotic fish is developed. Specifically, two stages of S-start are further identified: 1) Bending stage: To ensure the maximum turning speed, fish increases the effective area in the posterior which is far from the rotation center to gain the maximum moment. At this point, fish bends its body into S-sharp. The other benefit from the S-sharp is to reduce the movement of center of gravity, thus helping keep body balance and strengthen the body stability in turning. Under the action of turning moment, the fish turns to the goal direction quickly. 2) Unbending stage: An L-shift method is designed to obtain the main propulsive force. In this method, there are always some bending joints perpendicular to the swimming direction to provide the force. At the same time, fuzzy logic method is adopted to control the turning action of unbending joints in a relative small angle to guarantee the turning accuracy. At the end of S-start, central pattern generator (CPG) is employed to smoothly switch to the steady swimming. In order to ensure the swimming direction and obtain the major propulsive force, small amplitudes and high frequency for CPG are adopted at the beginning. Then, relatively large amplitudes and low frequency are chosen in steady swimming. At last, the experimental results on a four-joint robotic fish demonstrate the validity of this method, in which the robot attained a maximum turning speed of $318.08 \pm 9.20^\circ/\text{s}$ and a turning accuracy of $1.03 \pm 0.48^\circ$. The results obtained will shed light on the maneuverability of swimming robots.

Key words Biomimetic robotic fish, fast start, S-start, turning movement

Citation Wu Zheng-Xing, Yu Jun-Zhi, Su Zong-Shuai, Tan Min. Control and implementation of S-start for a multijoint biomimetic robotic fish. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(11): 1914–1922

收稿日期 2013-06-20 录用日期 2013-06-26
Manuscript received June 20, 2013; accepted June 26, 2013
国家自然科学基金 (61075102, 61273326, 61333016), 北京市自然科学基金 (4122084) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61075102, 61273326, 61333016) and Beijing Natural Science Foundation (4122084)
庆祝《自动化学报》创刊 50 周年专刊约稿
Invited Articles for the Special Issue for the 50th Anniversary of Acta Automatica Sinica
1. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室 北京 100190
1. State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

大自然赋予鱼类高水平的游动技能. 凭借优异的生理构造和本能的游动机制, 鱼类既能够高效率持久巡游, 也能爆发式起动转向. 鱼类游动的高效率、高机动性等特征都远超出目前各种人造水下潜器. 因此, 众多的科研人员关注鱼类的形态结构及游动方式, 希望能够借鉴到水下潜器的研制中, 提高水下潜器的性能. 目前, 作为一种研究和实验平台, 机器鱼已经被越来越多地研制开发出来^[1–3].

快速起动 (Fast-start) 作为一种高能量、爆发式的非稳态运动, 是鱼类在逃避敌害或捕捉猎物时

表现出的一种高机动行为^[4-5]。通过快速起动, 鱼类获取极高的转向速度或加速度, 迅速改变游动模态, 趋利避害, 提高自身生存能力。根据运动形态的差异, 快速起动分为 C 形起动和 S 形起动^[6]。C 形起动是一种比较常见的起动方式, 因起始阶段鱼体弯曲成 C 形而得名, 常见于鱼类在逃避危险时的大范围转向。相反, S 形起动则是起动初始时鱼体形变为 S 形, 多见于细长体鱼类的捕食行为, 如狗鱼 (*Esox lucius*, *Esox masquinongy*)、梭鱼 (Pike) 等。

最初, S 形起动被认为是 C 形起动的一种特殊形式, 同样是由毛特纳氏细胞 (Mauthner's cell) 构成的神经组织所控制触发^[6-7]。S 起动的原因在于起动过程中, 鱼体后段肌肉 (包含尾鳍) 不足以承受水的阻力而无法形成标准的 C 形起动^[8]。但是, 随着对快速起动研究的深入, 越来越多的证据表明 S 形起动独立于 C 形起动^[9]。Hale 通过详细比较北美狗鱼 (*Muskellunge*, *Esox masquinongy*) 两种起动方式的运动学特征和肌电信号, 提出 S 形起动不同于 C 形起动, 是由另外一类神经组织所触发^[10]。通常, S 形起动包括两个阶段: 1) 弯曲阶段: 鱼体由静止或者稳态游动中突然 S 形变, 获取转向速度, 迅速转向目标方向, 接着尾部大幅度摆至垂直于鱼体中线位置, 进一步获取转向力矩; 2) 伸展阶段: 到达目标方向后, 鱼体由弯曲状态恢复为游动状态。整个过程非常短暂, 持续约 100~200 ms, 但转动角速度却高达 2800°/s。另外, 在一次 S 形起动中, 可能出现多次的加速行为。例如, David 等研究狗鱼 S 形起动中加速度峰值及尾鳍摆动周期个数时, 发现狗鱼能够实现多达 4 次的加速^[11]。

目前, 科研人员搭建了多种不同的机器鱼平台来研究和模拟鱼类的起动和转向行为。例如, 通过分析鱼类的 C 形起动特征, Liu 等设计了机器鱼 C 形转向的运动学方程, 并离散化为查询表, 在线实现了峰值速度为 120°/s 的机器鱼 C 形起动^[12-13]; Yu 等根据鱼类游动的动力学分析, 以增加关节偏移转角的方式模拟鱼类 C 形转向, 在三关节机器鱼上实现了 120°/s 的 C 形转向^[14]; Conte 等设计了一套采用体外驱动的机械装置来模拟狗鱼的 S 形起动行为, 取得了 40 m/s² 的加速度和 1.2 m/s 的起动速度 (该装置没有任何游动能力)^[15]; 陈宏等建立了细长体鱼类 S 形起动的动力学方程, 从理论角度分析了 S 形起动时鱼体的受力, 并研究了尾鳍摆幅系数等参数对 S 形起动性能的影响^[16]。但是, 由于流体力学的复杂性, 很难根据动力学方程实时控制机器鱼的 S 形起动行为。因此, 本文通过分析北美狗鱼 S 形起动的形态特征, 建立了 L 形滑动的 S 形起动模型。在弯曲阶段, 保证鱼体平稳的前提下, 增大转向力矩, 提高转向速度, 而在伸展阶段, 以 L 形滑动

方式增加伸展过程中的前推力。同时, 采用模糊控制来实时调整鱼体关节行为, 保证转向精度。另外, 变幅值-频率的中枢模式发生器 (Central pattern generator, CPG) 被用来实现向稳态游动的平滑过渡。最终, 机器鱼以 318.08 ± 9.20°/s 的峰值速度及 1.03 ± 0.48° 转向误差实现了 S 形起动, 证明了本文 S 形起动模型的有效性, 对提升水下游动机器人的机动性能具有指导意义。

本文的结构安排如下: 第 1 节主要介绍本文仿生机器鱼的机械结构; 第 2 节给出 S 形起动的分析与控制; 第 3 节详细介绍仿生机器鱼的 S 形起动实验, 并对实验结果进行分析和讨论; 第 4 节总结全文。

1 仿生机器鱼介绍

图 1 为本文实验所用仿生机器鱼机械结构示意图。整条机器鱼由鱼头、刚性的鱼体前段和灵活摆动的后段及尾鳍构成。其中, 鱼头包含一个 Yaw 方向的自由度, 能够灵活转动 ±45°; 鱼体前段为聚丙烯类材料 (Polypropylene, PP) 制作的刚性外壳, 容纳控制板、无线通信模块、锂电池及多自由度的胸鳍机构等 (本算法针对 BCF 模式, 未考虑胸鳍作用); 鱼体后段为四个灵活摆动的关节; 尾鳍是以 NACA-0018 作为横截面的三维硬性鳍面, 通过聚氯乙烯 (Polyvinylchloride, PVC) 制成的尾柄固连在最后一个关节。为了防水, 整套机构由两段乳胶制作的黑色蒙皮包裹。机器鱼体长约为 614 mm, 体重为 2.21 kg。相关的技术参数详见表 1。

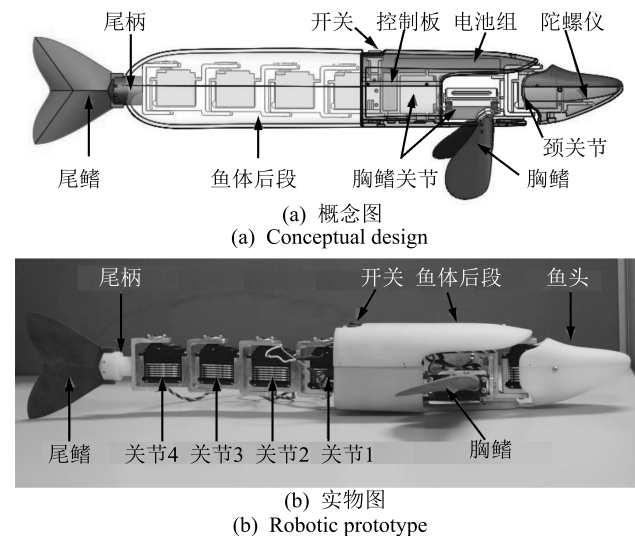


图 1 机器鱼机械结构示意图

Fig. 1 Mechanical configuration of the developed robotic fish

表 1 仿生机器鱼的相关技术参数
Table 1 Technical parameters of the robotic fish prototype

参数	描述
尺寸(长 × 宽 × 高)	约 614 × 83 × 81 mm ³
总重量	约 2.21 kg
关节驱动	舵机驱动 (HS-7940TH)
主控芯片	ARM Cortex-M4
传感器	陀螺仪传感器
工作电压	DC 7.4 V

2 S 形起动分析与控制

2.1 北美狗鱼 S 形起动分析

自然界中, 北美狗鱼性情凶狠, 行动异常迅速、敏捷, 具有典型的 S 形起动行为. 北美狗鱼的 S 形起动行为包括方向改变的 S 形起动和直线方向的 S 形起动^[11]. 某些情况下, 北美狗鱼仅靠胸鳍和腹鳍的协调运动就能够改变起动方向. 但是, 本文研究范围限于依靠身体-尾鳍完成的、方向改变的 S 形起动行为. 图 2 给出了北美狗鱼 S 形起动的视频截图. 其中, 标号 A~C 为起动的弯曲阶段: 北美狗鱼由静止状态突然 S 形变, 依靠形变产生转向力矩, 迅速到达目标方向; 标号 D~F 为伸展阶段: 到达目标方向后, 北美狗鱼快速打开鱼体. 整个起动过程持续时间约为 80~90 ms, 转向加速度先增加后减小, 转向速度呈现单峰值变化, 最高达到 2800°/s, 最终完成约为 50° 的转向^[10]. 观察发现, 在 S 形起动中, 北美狗鱼鱼体分为三部分: 1) 鱼头至胸鳍 (S_1): 转向过程中的方向定位; 2) 胸鳍至臀鳍前缘 (S_2): 在起动中正向弯曲 (定义鱼头弯曲的同侧方向为正方向), 提供转向力矩及伸展过程中的方向调整; 3) 臀鳍至尾鳍 (S_3): 在起动过程中反向弯曲, 提供转向力矩和

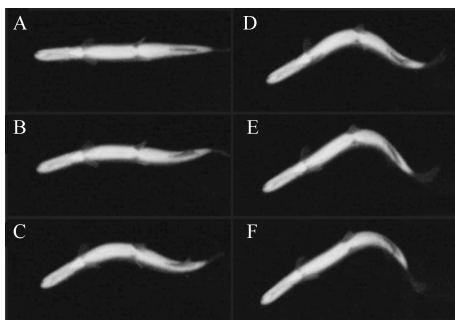


图 2 北美狗鱼 S 形起动视频截图^[10]
Fig. 2 Snapshot sequence of an S-start of the *Esox masquinongy*^[10]

前推力. 另外, 每段鱼体分别包括若干体段. 通过各体段间的协调配合, 狗鱼自然流畅地完成 S 形变和滑动伸展.

根据上述分析, 采用链式机构的多关节机器鱼容易实现鱼类的 S 形起动行为. 首先, 建立多关节机器鱼随体坐标系: 以静止时机器鱼前喙点为坐标原点 O , 机器鱼体长方向为 x 轴, 体宽方向为 y 轴, 建立直角坐标系 $O-xy$, 如图 3 所示. 根据狗鱼 S 形起动的分析, 机器鱼整体分为 S_1, S_2, S_3 三段, 每段包含若干关节, 共 $n + 1$ 段. 以 l_i, m_i 分别表示关节 i 的长度和质量.

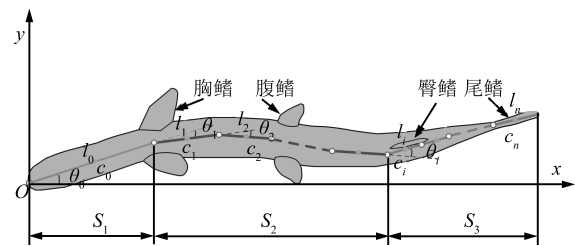


图 3 多关节机器鱼坐标系示意图
Fig. 3 Coordinate systems defined to describe the multi-link robotic fish swimming

假设机器鱼每段关节的形心与质心重合, 标记为 c_i . 第 $i - 1$ 关节与 i 关节的关节夹角表示为 θ_i . 显然, 关节 i 与 x 轴的夹角为 $\sum_{j=0}^i \theta_j$.

2.2 弯曲阶段

在弯曲阶段, 鱼体由静止突然 S 形变: S_1, S_2 段向鱼体同侧弯曲, S_3 段转向另一侧, 整个鱼体呈 S 形. 一般讲, S_2, S_3 段的弯曲程度稍大于 S_1 段, 随后 S_2 段大幅度弯曲. 特别的, 在最大形变处, 鱼体基本相互垂直, 呈 L 形. 研究数据表明, 在该阶段, 鱼体基本没有前冲力, 在 S 形变提供的转向力矩作用下, 鱼头快速转向目标方向^[17]. 与 C 形起动相比, S 形起动在该阶段的平均转向速度和加速度都略低, 主要原因是 S_3 的异侧弯曲, 导致弯曲过程中的转动速度和划水距离均小于 C 形起动, 无法提供与 C 形起动等同的转向力矩. 但是, 我们认为 S 形起动更有利于保证小角度范围转向时的转向精度. 显然, 与逃逸行为相比, 捕食行为需要更高的转向精度. 与 C 形变相比, S 形变能够减小起动中鱼体形变引起的重心移动量, 加强重心的稳定性. 重心的稳定有助于保持转向中鱼体的平衡, 增大鱼体本身的可控性, 同时还能够减小转弯半径, 有利于保证转向精度.

在保证鱼体稳定的前提下, 弯曲阶段应尽量提高转向速度. 流体中, 运动物体所受的流体力取决于物体的运动速度和有效面积 ($F \propto S_d v^2$). 在速度相同的条件下, 有效面积越大, 流体力就越大. 因此, 在

弯曲阶段, 增大有效面积能够提高转向速度. 考虑到 S_3 段离鱼体重心位置最远, 转向力臂最大. 因此, 通过增大 S_3 段所受的流体力, 能够有效地增大转向力矩. 显然, 当 S_3 段平行于其段重心与鱼体重心连线时, 其在力臂方向的投影面积最大, 即流体力的有效面积最大. 此时, 在速度一定的条件下, 鱼体获取的流体力最大. 图 4 为机器鱼弯曲阶段的示意图. 在弯曲阶段, 机器鱼鱼头 S_1 段在转向力矩的作用下迅速转向目标方向, 并实时根据转向角度控制 S_2 , S_3 的运动; S_2 段的每个关节均以最大速度转向限制角 (受机械条件等约束), 提供给 S_3 段较大的运动速度; S_3 段则保持伸直状态, 实时指向鱼体重心, 提供主要的转向力矩.

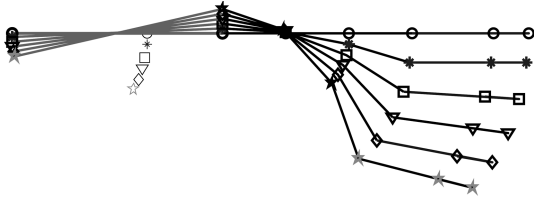


图 4 机器鱼弯曲阶段示意图

Fig. 4 Schematic diagram of bending stage

假设机器鱼每段关节的形心与重心重合, 容易计算每段关节重心 (c_i) 的坐标 (x_{c_i}, y_{c_i}) 为

$$\begin{cases} x_{c_i} = \frac{1}{2}l_i \cos \theta_i + \sum_{j=0}^{i-1} l_j \cos \theta_j, & i = 1, \dots, n \\ y_{c_i} = \frac{1}{2}l_i \sin \theta_i + \sum_{j=0}^{i-1} l_j \sin \theta_j, & i = 1, \dots, n \\ x_{c_0} = \frac{1}{2}l_0 \cos \theta_0 \\ y_{c_0} = \frac{1}{2}l_0 \sin \theta_0 \end{cases} \quad (1)$$

机器鱼鱼体重心 (c_f) 的坐标 (x_c, y_c) 为

$$\begin{cases} x_c = \frac{\sum_{i=0}^n m_i x_{c_i}}{\sum_{i=0}^n m_i} \\ y_c = \frac{\sum_{i=0}^n m_i y_{c_i}}{\sum_{i=0}^n m_i} \end{cases} \quad (2)$$

根据鱼体 S_3 段起点 (x_i, y_i) 和机器鱼重心 (c_f) 的坐标, 容易计算 S_3 段在弯曲过程中, 与坐标轴的实时夹角 θ 为

$$\theta = \arctan \frac{y_i - y_{c_f}}{x_i - x_{c_f}} \quad (3)$$

其中, S_3 段起点的坐标 (x_i, y_i) 为

$$\begin{cases} x_i = \sum_{j=0}^{i-1} l_j \cos \theta_j \\ y_i = \sum_{j=0}^{i-1} l_j \sin \theta_j \end{cases} \quad (4)$$

根据几何关系, 得到 S_3 段的实时转动角度 θ_i 为

$$\theta_i = \theta - \sum_{j=0}^{i-1} \theta_j \quad (5)$$

2.3 伸展阶段

在伸展阶段, 狗鱼展开鱼体, 恢复稳态游动. 鱼体伸展提供前进推力, 快速推出鱼体. 但是, 额外产生使鱼体偏离目标方向的偏向力矩. 因此, 在该阶段必须根据角度反馈, 实时调整前进方向, 保证转向精度. 在伸展末期, 需要考虑向稳态游动过渡. 因此, 本小结分三部分设计伸展阶段: 以 L 形滑动方式打开鱼体; 采用模糊控制调整鱼头方向; 设计变幅值-频率的 CPG 模型向稳态游动过渡.

2.3.1 L 形滑动法

在弯曲阶段末期, S_2 段大幅度形变, 鱼体呈现 L 形. 为方便描述, 定义垂直于鱼体轴线的关节集合为 P . 在伸展过程中, 集合 P 中不断有关节 (称为离开关节 (Leaving-joint)) 恢复为伸直状态, 另有其他关节 (称为进入关节 (Entering-joint)) 转动到集合 P . 而集合 P 始终保持与鱼体轴线垂直, 并随离开关节的转动, 迅速向鱼体末端移动. 在滑动中, 集合 P 受到的流体力 (F_p) 基本平行于前进方向, 提供鱼的前推力. 为了加快伸展速度及集合 P 的滑动速度, 离开关节和进入关节均以最快速度转动. 而进入关节的反向转动, 产生与伸展运动相反的作用力矩 (τ_e), 缓冲部分偏向力矩, 减小滑动中的方向偏离, 如图 5 所示. 除了离开关节和进入关节外, 集合 P 内其他关节段则保持与鱼体前进方向 (S_1) 垂直, 如图 6 所示, 其转动的关节角 θ_p 为

$$\theta_p = \theta_r - \sum_{j=1}^{i-1} \theta_j \quad (6)$$

式中, θ_r 为约束角度, 取 90° , θ_j 为集合 P 之前各关节的关节角度.

S_3 段中, 未进入集合 P 的其他关节保持与前进方向平行, 以减小前冲过程中的流体阻力, 其转动的关节角度 θ_s 为

$$\theta_s = \theta_r - \theta_e \quad (7)$$

式中, θ_r 为约束角度, θ_e 为进入关节的实时关节角度.

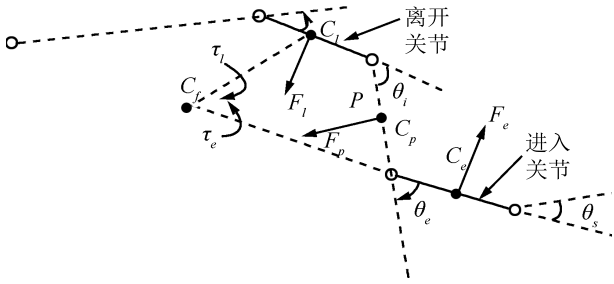


图 5 机器鱼伸展阶段分析图

Fig. 5 Analysis for unbending stage of robotic fish

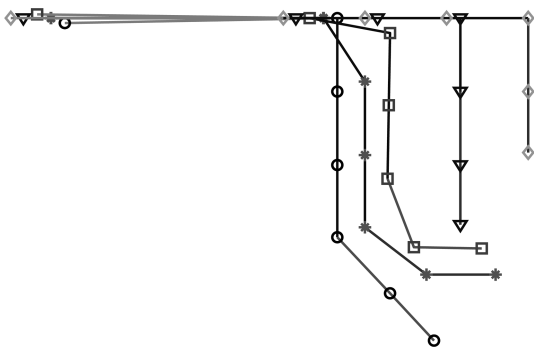


图 6 机器鱼伸展阶段示意图

Fig. 6 Schematic diagram of unbending stage of robotic fish

2.3.2 方向保持

L 形滑动过程中, 关节集合 P 产生的偏向力矩导致方向偏离. 因此, 必须及时调整鱼体前进方向, 保证转向精度. 因为 S 形起动过程的水动力学较复杂, 难以建立鱼体关节运动与转向角度间的精准关系. 因此, 本文采用模糊方法来调整方向. 取鱼头与目标方向的误差值 (e) 和误差变化率 (Δe) 作为模糊控制器的两个输入, 对恢复伸直状态关节的角度控制量作为输出 (u), 依靠实时调整已伸直关节的小角度摆动, 调节鱼头运动, 使其回到目标方向.

模糊控制结构框图如图 7 所示, $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$ 分别表示在第 k 个离散时刻的机器鱼转向角度误差及误差变化率, 定义如下:

$$e(k) = \theta(k) - \theta_{ref} \tag{8}$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \tag{9}$$

其中, θ_{ref} 表示机器鱼的目标角度, $\theta(k)$ 表示机器鱼第 k 个时刻的转向角度.

定义转向角度误差值 $e(k)$, 误差变化率 $\Delta e(k)$, 输出控制量 $u(k)$ 的基本论域为: $[-e_L, e_H]$, $[-ec_L, ec_H]$, $[-u_L, u_H]$. 另外, 将输入输出变量分

别进行模糊化处理: $e(k)$ 模糊化处理后表示为模糊集合 $A: \{NB, NS, ZE, PS, PB\}$, 分别代表角度差距 {负大, 负小, 适中, 正小, 正大}. $\Delta e(k)$ 模糊化处理后得到模糊集合 $B: \{N, Z, P\}$, 分别表示 {负, 适中, 正}. 输出变量 $u(k)$ 的模糊集合设置为 $C: \{NB, NS, ZE, PS, PB\}$, 分别表示 {负大, 负小, 适中, 正小, 正大}.

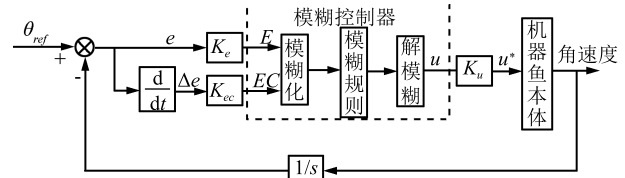


图 7 机器鱼模糊控制器结构框图

Fig. 7 Structure of fuzzy logic algorithm for robotic fish

为提高运算效率, 隶属度函数均选择三角函数和 z 函数, 详见图 8~10. 模糊控制器的输入输出论域控制在 $[-1, 1]$, 通过输入输出的比例因子来实现变换, 其中:

$$\begin{cases} K_e = \frac{2}{e_H - e_L} \\ K_{cc} = \frac{2}{ec_H - ec_L} \\ K_u = \frac{u_H - u_L}{2} \end{cases} \tag{10}$$

式中, K_e, K_{cc}, K_u 分别是角度误差 e , 误差变化率 Δe , 和输出 u 的比例因子. 根据上述比例因子, 通过式 (11) 得到定义在 $[-1, 1]$ 上的规则化输入, 并将未经比例缩放的输出 u 转换为实际尺度的输出 u^* .

$$\begin{cases} E = K_e[e - e_L] - 1 \\ EC = K_{cc}[\Delta e - ec_L] - 1 \\ u^* = K_u(u + 1) + u_L \end{cases} \tag{11}$$

模糊规则库源自人类控制专家的经验, 是模糊控制器的核心, 代表了模糊控制的智能性, 并直接影响控制器的性能. 本文模糊控制器的规则库由 15 条 “If-then” 型的模糊条件语言构成, 详见表 2. 其中, 模糊规则为

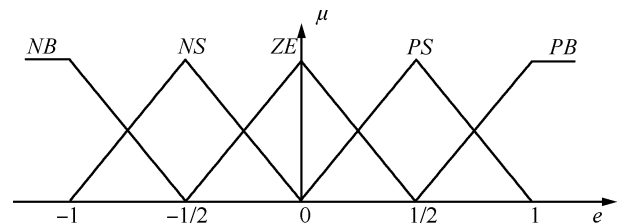


图 8 模糊控制器输入 e 的隶属度函数

Fig. 8 Membership functions for e

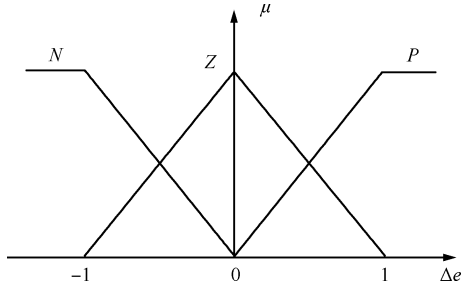


图 9 模糊控制器输入 Δe 的隶属度函数
Fig. 9 Membership functions for Δe

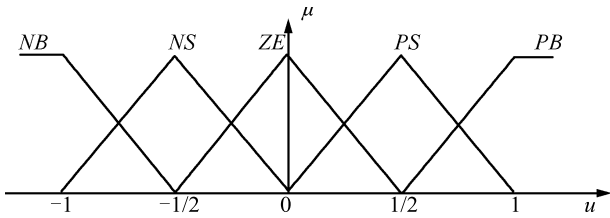


图 10 模糊控制器输出 u 的隶属度函数
Fig. 10 Membership functions for u

表 2 模糊控制器的规则库

Table 2 Rule base of fuzzy regulator

U	EC		
	N	Z	P
E	NB	PB	PB
	NS	PS	PB
E	ZE	PS	ZE
	PS	NS	NS
	PB	NB	NB

If E is A_i , and EC is B_j , then U is C_{ij}

解模糊化时, 推理方式采用 Mamdani 类型, 输出的去模糊采用重心法, 具体表达式为

$$u = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i(U_i)U_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i(U_i)} \quad (12)$$

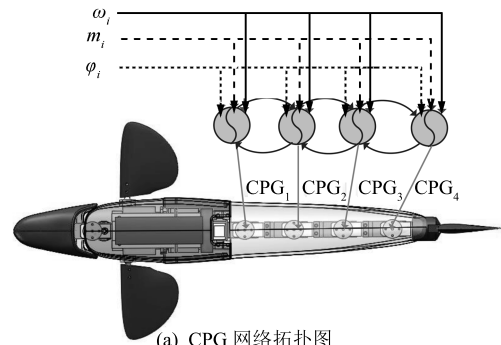
式中, u 是模糊控制器的清晰化输出, m 是规则库中被激活的模糊规则的个数, $\mu_i(U_i)$ 是第 i 条规则的隶属度输出.

根据式 (11), 得到作用在机器鱼关节上的角度实际控制量 u^* .

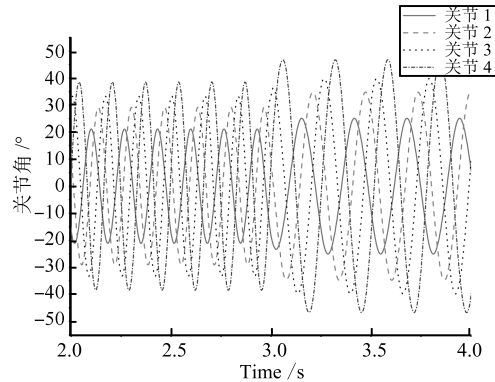
2.3.3 稳态过渡

研究表明, 生物体的节律运动, 例如呼吸、蠕动、游泳或飞行等, 多数是由 CPG 控制的^[18]. 通常, CPG 是指一类存在于无脊椎动物和脊椎动物体内

中枢神经系统中的神经元电路^[19]. CPG 通过神经元之间的相互抑制, 实现自激振荡, 产生稳定的周期信号. 现在基于 CPG 的控制方法, 广泛应用于机器人控制中^[20-21]. 在机器鱼控制方面, 与传统的鱼体波模型相比, CPG 作为一种在线控制方法, 更易于实现多模态游动, 并能够在参数发生变化时, 实现信号的平滑过渡^[22-23]. 本文基于 Hopf 振荡器构建 CPG 模型, 控制机器鱼的稳态游动. 图 11 (a) 给出机器鱼 CPG 的链式网络拓扑结构图; 图 11 (b) 给出 CPG 的输出信号示意图. 可以看到当 CPG 的参数发生变化时, 输出信号能够进行平滑的过渡. 其中, 参数取值为: $m_1 = 8.70/13.05$, $m_2 = 19.08/28.62$, $m_3 = 25.50/38.25$, $m_4 = 40.39/60.59$, $\omega_i = 38/25$, $\varphi_i = 75^\circ$, $h_1 = 4.0$, $h_2 = 5.0$, $c_i = 6.0$.



(a) The topology of the adopted CPG network



(b) The outputs of CPG for robotic fish in transition stage

图 11 CPG 网络拓扑结构及输出信号

Fig. 11 The adopted CPG network and outputs for robotic fish

$$\begin{cases} \dot{x}_i = -\omega_i y_i + x_i(m_i - x_i^2 - y_i^2) + h_1(x_{i-1} \cos \varphi_i + y_{i-1} \sin \varphi_i) \\ \dot{y}_i = \omega_i x_i + y_i(m_i - x_i^2 - y_i^2) + h_2(x_{i+1} \sin \varphi_{i+1} + y_{i+1} \cos \varphi_{i+1}) \\ z_i = c_i y_i \end{cases} \quad (13)$$

式中, $i = 1, \dots, n$, n 表示 CPG 单元的个数; x_i, y_i 表示状态变量; ω_i, m_i 分别表示振荡神经元的固有频率和幅值; φ_i 表示振荡神经元间的相位差; h_1, h_2 为耦合系数, 其大小影响收敛速度; c_i 表示输出信号的放大系数; z_i 表示输出信号.

观察发现, 狗鱼展开鱼体后, 仅靠 S_3 段鱼体若干周期的高频摆动 (频率高达 11 ~ 12.5 Hz), 便能轻易冲射出. 考虑到本文机器鱼关节舵机无法提供如此高的频率, 因此, 机器鱼所有关节均以高频率摆动, 进一步获取较大前推力. 同时, 为减小鱼头摆动幅度, 保持转向精度, 采用小幅值的控制信号. 在机器鱼游出一定距离后, 幅值开始增大, 频率减慢, 最终进入稳态游动.

3 实验与分析

根据上述 S 形起动的控制与分析, 采用四关节仿生机器鱼进行实验验证. 起动时, 机器鱼前三个关节作为 S_2 段的转动关节, 其在弯曲阶段的限制角度分别为: $\{45^\circ, 60^\circ, 40^\circ\}$; 第四关节及尾鳍作为 S_3 段, 实时指向鱼体重心. 另外, 根据前期实验采集的数据, 模糊控制器中的模糊变量 e 、 ec 及 u 的论域范围分别定为: $[-18, 18]$, $[-5, 5]$, $[-25, 25]$.

为验证 S 形起动方向改变的有效性, 首先给出 S 形转向实验, 即机器鱼由静止状态开始 S 形变, 完成预定角度的转向, 恢复静止状态. S 形转向分别以 -30° 和 -45° 作为目标, 由陀螺仪传感器实时采集转向角度. 图 12 给出两组实验中机器鱼的转向角度及速度曲线. 根据曲线分析, 机器鱼在接收到转向命令后, 开始加速转向目标方向, 峰值速度达到 $324.8^\circ/\text{s}$ ($\theta_{ref} = -45^\circ$); 等转到目标方向, 因惯性作用, 鱼头会继续向前转动, 例如, 机器鱼在 -45° 转向时, 最大转向角度实际为 -61.8° . 进入伸展阶段后, 在鱼体展开带来的回冲力 (Recoil) 作用下, 机器鱼开始回转. 此时, 利用模糊控制, 机器鱼进行方向调整, 最终稳定在目标角度. 因为刚结束时的水面波动, 转向角度曲线呈现一定的波动. 表 3 给出了 5 次 -45° S 形转向的统计数据. 根据统计分析, 机器鱼在 -45° S 形转向中, 峰值转向速度达到 $318.08 \pm 9.20^\circ/\text{s}$, 而转向角度误差控制在 $1.03 \pm 0.48^\circ$, 取得了良好的转向效果. 但是, 由于动力密度 (定义为提供的转向动力/体重) 较低, 无法达到真实鱼类此时的弹射速度, 机器鱼在伸展阶段仅向前推出了有限距离, 详见图 13. 这说明采用变幅值-频率 CPG 模型向稳态游动过渡, 利用鱼体左右摆动产生前推力的必要性.

然后, 进行了完整的 S 形起动实验, 即在伸展阶段末期, 考虑尾部摆动推进及向稳态游动方式过渡. 表 4 给出该阶段 CPG 的参数设置. 在前期阶段,

为增加推进力, 同时减小头部摆动幅度, CPG 采用高频率, 小幅值的参数, 频率因子高达 38. 而进入稳态游动后, 频率因子下降到 24, 同时幅值参数增大

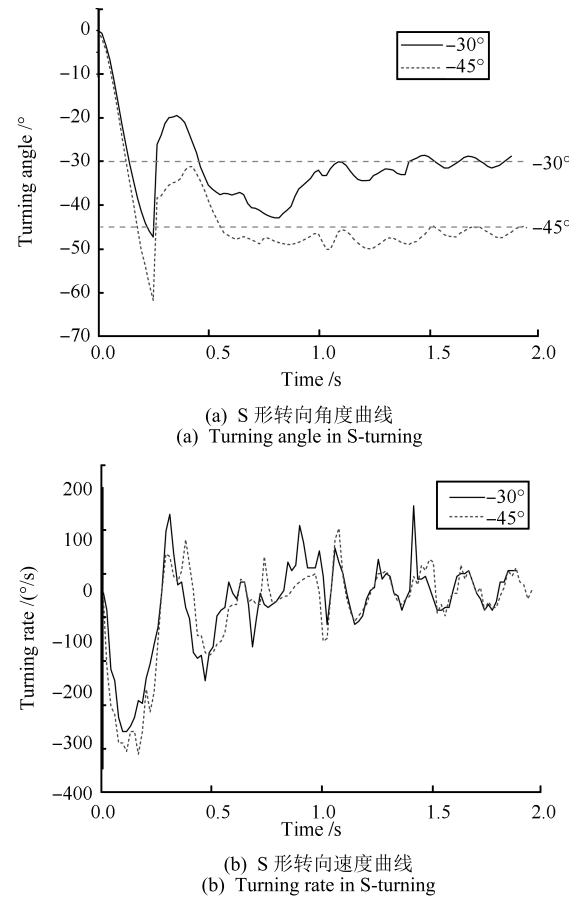


图 12 机器鱼 S 形转向实时数据曲线

Fig. 12 Real-time data curve in S-turning of robotic fish

表 3 机器鱼 -45° S 形转向统计数据

Table 3 Statistical data on -45° S-turning of robotic fish

参数	#1	#2	#3	#4	#5	均值±标准差
峰值速度 ($^\circ/\text{s}$)	-324.8	-302.4	-319.2	-324.8	-319.2	-318.08 ± 9.20
平均速度 ($^\circ/\text{s}$)	-72.00	-66.32	-76.36	-76.36	-70.00	-72.21 ± 4.30
转向角度 ($^\circ$)	-46.41	-46.02	-46.36	-46.14	-45.22	-46.03 ± 0.48
角度误差 ($^\circ$)	-1.41	-1.02	-1.36	-1.14	-0.22	-1.03 ± 0.48

表 4 过渡阶段 CPG 的参数设置

Table 4 Parameters of CPG control in transition stage

参数	m_1	m_2	m_3	m_4	φ_i	h_1	h_2	c_i	ω_i
前期	8.70	19.08	25.50	40.39	75°	4.0	5.0	6.0	38
后期	13.05	28.62	38.25	60.59	75°	4.0	5.0	6.0	24

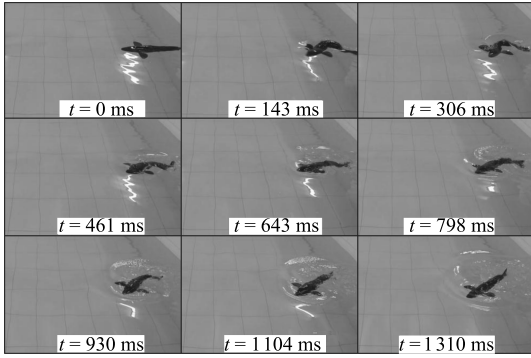


图 13 机器鱼 -45° S 形转向视频截图

Fig. 13 Snapshot sequence of a -45° S-turning of robotic fish

了 1.5 倍. 图 14 给出 -45° S 形起动过程的转向角度曲线. 根据曲线分析, 机器鱼到达目标方向后, 开始高频率-小幅值的摆动 (约 $1.5 \sim 2.5$ s), 然后进入低频率-大幅值的稳态游动 (约 $2.5 \sim 4$ s). 由于 CPG 固有的抗干扰能力, 在幅值及频率因子发生改变时, CPG 仍然输出稳定平滑的控制信号, 保证了机器鱼模态的稳定平滑切换, 具体的 S 形起动过程参考图 15.

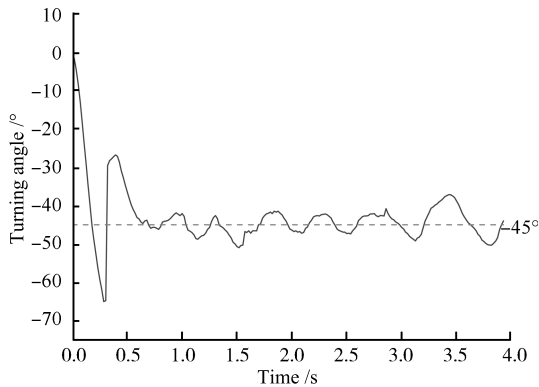


图 14 机器鱼 -45° S 形起动转向角度曲线

Fig. 14 Turning angle of a complete -45° S-start

上述实验结果验证了本文方法的有效性. 第一组实验考察 S 形起动的转向速度及精度. 根据统计分析, 该方法取得了良好的结果, 角度误差控制在 $1.03 \pm 0.48^\circ$, 峰值速度达到 $318.08 \pm 9.20^\circ/\text{s}$, 远远高于文献 [13] 中 120° 的最大转向速度. 考虑到机器鱼动力装置的限制, 所用舵机的频率及力矩有限, 无法在 L 形滑动过程中, 像真实鱼类一样将鱼体冲射出去. 因此, 本算法在过渡阶段采用了变幅值-频率的 CPG 模型. 利用高频率的身体摆动实现机器鱼的迅速游出. 根据数据曲线, 机器鱼在高频率、低幅值的摆动中快速游出, 而且摆动幅度较小, 保证了游动方向. 另外, 由于固有的抗干扰能力, CPG 在频率、幅值因子发生变化时, 仍能输出平滑的控制

信号, 保证了机器鱼平稳、流畅地向稳态游动方式过渡.

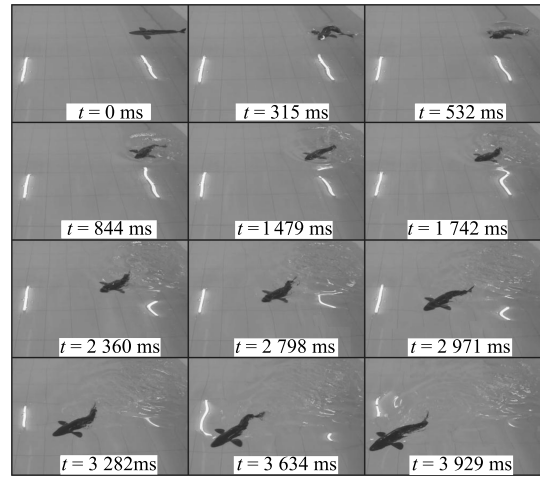


图 15 机器鱼 -45° S 形起动视频截图

Fig. 15 Snapshot sequence of a complete -45° S-start of robotic fish

4 结论

本文针对基于链式机构的多关节仿生机器鱼, 提出了一种 S 形起动的控制方法并进行了实验验证. 在弯曲阶段, 鱼体 S 形变保证重心平稳移动的条件下, 增大转向力矩, 提高转向速度, 获得了 $318.08 \pm 9.20^\circ/\text{s}$ 的峰值转向速度; 在伸展阶段, L 形滑动方法打开鱼体, 获得前推力. 同时, 模糊控制方法的使用, 较好地保证了转向精度. 变幅值-频率的 CPG 模型在保证转向精度的同时, 进一步获得推进力, 完成向稳态游动的平稳过渡.

自然界中, 鱼类快速起动时有效地利用了胸鳍等鳍面, 获得了更加灵活的机动性能. 因此, 在下一步研究中, 将探索胸鳍在快速起动中的作用, 同时利用胸鳍的攻角控制将机器鱼的快速起动行为推广到三维游动空间.

References

- 1 Yu J, Ding R, Yang Q, Tan M, Wang W, Zhang J. On a bio-inspired amphibious robot capable of multimodal motion. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, **17**(5): 847-856
- 2 Liang J H, Wang T M, Wen L. Development of a two-joint robotic fish for real-world exploration. *Journal of Field Robotics*, 2011, **28**(1): 70-79
- 3 Park Y J, Jeong U, Lee J, Kwon S P, Kim H Y, Cho K J. Kinematic condition for maximizing the thrust of a robotic fish using a compliant caudal fin. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, **28**(6): 1216-1227
- 4 Domenici P, Blake R W. The kinematics and performance of fish fast-start swimming. *Journal of Experimental Biology*, 1997, **200**: 1165-1178

- 5 Westneat M W, Hale M E, Mchenry M J, Long J H. Mechanics of the fast-start: muscle function and the role of intramuscular pressure in the escape behavior of *Amia calva* and *Polypterus palmas*. *Journal of Experimental Biology*, 1998, **201**(Pt 22): 3041–3055
- 6 Hale M E. S- and C-start escape responses of the muskellunge (*Esox masquinongy*) require alternative neuromotor mechanisms. *Journal of Experimental Biology*, 2002, **205**(Pt 14): 2005–2016
- 7 Weiss S A, Zottoli S J, Do S C, Faber D S, Preuss T. Correlation of C-start behaviors with neural activity recorded from the hindbrain in free-swimming goldfish (*Carassius auratus*). *Journal of Experimental Biology*, 2006, **209**(23): 4788–4801
- 8 Canfield J G. Some voluntary C-bends may be Mauthner neuron initiated. *Journal of Comparative Physiology A*, 2007, **193**(10): 1055–1064
- 9 Jayne B C, Lauder G V. New data on axial locomotion in fishes: how speed affects diversity of kinematics and motor patterns. *American Zoologist*, 1996, **36**(6): 642–655
- 10 Liu Y C, Bailey I, Hale M E. Alternative startle motor patterns and behaviors in the larval zebrafish (*Danio rerio*). *Journal of Comparative Physiology A*, 2012, **198**(1): 11–24
- 11 David G H, Blake R W. Prey capture and the fast-start performance of northern pike *Esox lucius*. *Journal of Experimental Biology*, 1991, **155**: 175–192
- 12 Liu J D, Hu H S. Mimicry of sharp turning behaviours in a robotic fish. In: Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona, Spain: IEEE, 2005. 3318–3323
- 13 Liu J D, Hu H S. Biological inspiration: from carangiform fish to multi-joint robotic fish. *Journal of Bionic Engineering*, 2010, **7**(1): 35–48
- 14 Yu J Z, Liu L Z, Wang L, Tan M, Xu D. Turning control of a multilink biomimetic robotic fish. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, **24**(1): 201–206
- 15 Conte J, Modarres-Sadeghi Y, Watts M N, Hover F S, Triantafyllou M S. A fast-starting mechanical fish that accelerates at 40 ms^{-2} . *Bioinspiration and Biomimetics*, 2010, **5**(3): 035004-1–035004-9
- 16 Chen Hong. Kinematic Mechanism Research on the Swimming and Maneuvering of Robot Fish. [Ph. D. dissertation], University of Science and Technology of China, China, 2006 (陈宏. 仿生机器人鱼巡游和机动的运动机理研究 [博士学位论文], 中国科学技术大学, 中国, 2006)
- 17 Schrieffer J E, Hale M E. Strikes and startles of northern pike (*Esox lucius*): a comparison of muscle activity and kinematics between S-start behaviors. *Journal of Experimental Biology*, 2004, **207**(3): 535–544
- 18 Marder E, Bucher D. Central pattern generators and the control of rhythmic movements. *Current Biology*, 2001, **11**(23): R986–R996
- 19 Ijspeert A J. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review. *Neural Networks*, 2008, **21**(4): 642–653
- 20 Ajallooeian M, Ahmadabadi M N, Araabi B N, Moradi H. Design, implementation and analysis of an alternation-based central pattern generator for multidimensional trajectory generation. *Robotics and Autonomous Systems*, 2012, **60**(2): 182–198
- 21 Aoi S, Egi Y, Sugimoto R, Yamashita T, Fujiki S, Tsuchiya K. Functional roles of phase resetting in the gait transition of a biped robot from quadrupedal to bipedal locomotion. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, **28**(6): 1244–1259
- 22 Yu J Z, Wang M, Su Z S, Tan M, Zhang J W. Dynamic modeling of a CPG-governed multijoint robotic fish. *Advanced Robotics*, 2013, **27**(4): 275–285
- 23 Wang G, Zhang D B, Lin L X, Xie H B, Hu T J, Shen L C. CPGs control method using a new oscillator in robotic fish. *Science China Technological Sciences*, 2010, **53**(11): 2914–2919

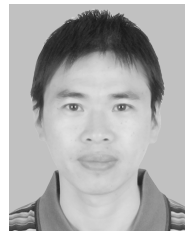


吴正兴 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室博士研究生。主要研究方向为仿生机器人。

E-mail: zhengxing.wu@ia.ac.cn

(**WU Zheng-Xing** Ph. D. candidate at the State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese

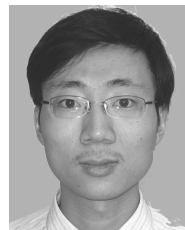
Academy of Sciences. His research interest covers control of biomimetic robots.)



喻俊志 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室研究员。主要研究方向为仿生机器人, 多机器人系统, 智能信息处理。本文通信作者。

E-mail: junzhi.yu@ia.ac.cn

(**YU Jun-Zhi** Professor at the State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers biomimetic robots, multirobot systems, and intelligent information processing. Corresponding author of this paper.)



苏宗帅 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室助理研究员。主要研究方向为仿生机器人机动控制。E-mail: zongshuai.su@ia.ac.cn

(**SU Zong-Shuai** Assistant professor at the State Key Laboratory of Management and Control for Complex

Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers fast and agile maneuvers of biomimetic robots.)



谭民 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室研究员。主要研究方向为机器人系统, 智能控制系统。E-mail: min.tan@ia.ac.cn

(**TAN Min** Professor at the State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of

Sciences. His research interest covers robotics and intelligent control system.)