



仿生䲟鱼水下机器人设计与三维解耦运动控制研究

谭桐 于林 郭凯 王旭阳 乔磊

Design and three-dimensional decoupled motion control study of bio-inspired robotic remora

TAN Tong, YU Lin, GUO Kai, WANG Xuyang, QIAO Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04108>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

拍动式仿䲟鲼水下机器人设计及其游动性能试验

Design and swimming test of myliobatid-inspired robot

中国舰船研究. 2022, 17(4): 139–144 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02497>

仿生机器鱼步态控制及闭环运动控制方法综述

Review of gait control and closed-loop motion control methods for bionic robotic fish

中国舰船研究. 2024, 19(1): 29–45 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03233>

基于CFD水动力参数的水下机器人轨迹跟踪控制

Trajectory tracking control of underwater vehicle based on hydrodynamic parameters calculated by CFD

中国舰船研究. 2022, 17(3): 237–245, 272 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02739>

复杂扰动下水下机器人的轨迹精确跟踪控制

Accurate track control of unmanned underwater vehicle under complex disturbances

中国舰船研究. 2022, 17(2): 98–108 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02236>

球形水下机器人滚进特性试验与动力学建模分析

Rolling test and dynamics simulation of spherical underwater vehicle

中国舰船研究. 2022, 17(6): 216–222 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02583>

水下打捞机器人执行器部分失效的有限时间轨迹跟踪控制

Finite time trajectory tracking control for partial actuator failure of underwater salvage robot

中国舰船研究. 2024, 19(5): 57–64 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03430>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.04108>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 谭桐, 于林, 郭凯, 等. 仿生䲟鱼水下机器人设计与三维解耦运动控制研究 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(6): 180–189.

TAN T, YU L, GUO K, et al. Design and three-dimensional decoupled motion control study of bio-inspired robotic remora[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(6): 180–189 (in both Chinese and English).

仿生䲟鱼水下机器人设计与 三维解耦运动控制研究



扫码阅读全文

谭桐, 于林, 郭凯, 乔磊*

上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240

摘要: [目的] 受䲟鱼吸附机制的启发, 设计具有吸附功能的仿生机器鱼, 通过吸附于宿主实现低能耗、远距离、大范围的航行, 弥补传统仿生机器鱼续航时间短的缺点。[方法] 以䲟鱼为仿生对象, 设计一种三维运动解耦、机动性能高、垂向运动响应速度快的仿生䲟鱼。采用线驱动鱼尾结构实现推进效率高的水平面运动, 基于胸鳍拍动实现解耦、垂向运动响应速度快的升潜运动。同时, 采用中枢神经控制器(CPG)实现高仿生度的游动姿态以及平滑的运动模式切换控制。设计自抗扰航向控制器(ADRC), 实现仿生䲟鱼在模型不确定性和环境扰动下的鲁棒、快速以及精确的航向控制。最后, 在水池中开展仿生䲟鱼的游动、升潜以及航向控制试验。[结果] 结果显示, 所设计的仿生䲟鱼具有机动性能高、响应速度快的三维解耦运动能力, 最大游动速度为 0.17 m/s, 最大升潜速度分别为 0.095 和 0.0995 m/s, 且所设计的 ADRC 航向控制器能够在 10 s 内完成对期望航向的快速高精度跟踪, 性能优于 PID 控制器。[结论] 所提三维运动解耦仿生䲟鱼机器人设计方案已完成解耦运动性能测试和航向自主控制试验验证, 可为后续仿生䲟鱼完成自主吸附等更多功能奠定基础。

关键词: 自主水下航行器; 水下机器人; 仿生䲟鱼; 三维解耦运动; 航向控制; 运动性能

中图分类号: U674.941

文献标志码: A

DOI: [10.19693/j.issn.1673-3185.04108](http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.04108)

0 引言

随着陆地资源的逐渐减少, 海洋作为一座蕴藏着丰富生物资源、化石能源的宝库, 愈发受到人类的重视^[1]。由于仿生机器鱼具有高机动性、高隐蔽性以及低噪声的特点, 在海洋资源探索方面具有广阔的应用前景^[2]。因此, 近年来仿生机器鱼的研究也受到广泛关注。但受仿生机器鱼内部电池容量和执行器的限制, 大多数仿生机器鱼的续航时间较短, 难以被应用到实际工程系统中^[3,4]。因此, 迫切需要设计一个能够解决此问题的结构或方法。

䲟鱼拥有由第一背鳍演变而来的吸盘, 可吸附于鲨鱼、海龟甚至是船底等宿主上, 能够以较低的能耗跟随宿主移动较远的距离, 这种行为被称为“搭便车”行为^[5]。受此行为启发, 设计具有

吸附功能的仿生䲟鱼机器人, 可弥补传统仿生机器鱼续航时间短、无法应用于工程实际的缺点。

在䲟鱼吸附于宿主底部的过程中, 其需要先单独潜入水底, 在宿主深度下进行平面运动, 待到达宿主底部后再进行单独的上浮运动, 与宿主发生接触从而实现吸附。因此, 在此过程中仿生䲟鱼需要有解耦的三维运动结构, 以满足后续更好的吸附控制。同时, 航向控制器是平面控制的核心, 决定了仿生䲟鱼能否以期望的航向角到达宿主位置。基于仿生䲟鱼的复杂形状, 其身体由刚性和柔软材料混合构成, 这就使得要构建其动力学模型非常具有挑战性。此外, 鱼鳍的运动以及水流和波浪也给系统带来了干扰。因此, 为了在各种干扰下实现仿生机器鱼的稳定、有效航向控制, 设计一种抗扰能力强、鲁棒性好的有效无模型控制器也至关重要。

收稿日期: 2024-08-12 修回日期: 2024-12-02 网络首发时间: 2025-01-09 10:57

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52101365); 中国科协青年人才托举工程项目(2021QNRC001); 上海市青年科技英才扬帆计划项目(21YF1419800); 中核集团“领创科研”项目; 中核集团“青年英才”科研项目

作者简介: 谭桐, 男, 2001 年生, 硕士生。研究方向: 水下机器鱼建模与控制。E-mail: Mr.Tlove@sjtu.edu.cn
乔磊, 男, 1989 年生, 博士, 副教授, 博士生导师。研究方向: 海洋智能机器人和无人系统。

E-mail: qiaolei@sjtu.edu.cn

*通信作者: 乔磊

Zhong 等^[6]设计了一种高机动性能的仿生机器鱼, 其采用线驱动鱼尾配合胸鳍转角实现了三维运动, 结果显示该运动机制结构简单、易于控制。Zhang 等^[7]借鉴飞虫翅膀和鱼类尾鳍结构, 设计了一种一对尾鳍和一对两自由度胸鳍联合运动的新型仿生机器鱼, 通过飞虫仿生的两自由度胸鳍, 再配合鱼类尾鳍, 可实现前后游动、上浮下潜、后空翻姿态以及滚动游动这4种游动姿态。Dai 等^[8]以狗鱼为仿生对象, 设计了一种多关节驱动的仿生狗鱼, 该仿生机器鱼可通过改变胸鳍攻角实现三维运动, 并能通过自适应视线法实现仿生狗鱼的三维运动控制。上述设计的仿生机器鱼具有机动性能好的三维运动结构, 但垂向运动结构需与水平面运动相配合, 故无法实现解耦的三维运动, 不利于仿生䲟鱼后续的吸附控制研究。Zhang 等^[9]设计了一种三维解耦的仿生䲟鱼, 提出了一种单关节尾鳍与一对360°转动的胸鳍相结合的水平面运动结构, 通过该结构, 可实现前后游动, 且在此基础上, 其内部还设置有基于活塞管的浮力调节机构, 可实现三维解耦运动。Wang 等^[10]设计了一种可实现跃水姿态的仿生海豚, 采用的是基于注射器的浮力调节机构, 同时为提高仿生海豚的滑翔能力, 还提出了一种可移动滑块的垂向运动机构, 其通过不同的滑块位置改变仿生海豚的重心, 再配合推进结构实现滑翔运动。上述仿生机器鱼虽然能够实现解耦的三维运动, 但基于活塞管的浮力调节结构存在响应速度慢、内部占用体积大的问题, 不利于仿生䲟鱼的内部结构设计以及实现在运动中完成吸附控制。因此, 需要设计一种三维解耦、垂向响应速度快的运动结构, 以满足仿生䲟鱼自主吸附结构的要求。

航向控制是仿生机器鱼控制中的常见问题, 也是实现路径跟踪等任务的基础。现有的一些研究对仿生机器鱼的航向控制进行了尝试。Morgansen 等^[11]采用比例-积分-微分控制器(proportional-integral-derivative control, PID)实现了双连杆机器鱼的闭环航向控制, 该控制器虽不依赖模型, 简单易实施, 但抗扰能力不足, 导致实际控制精度不高。Castaño 等^[12]采用非线性模型预测控制器(nonlinear model predictive control, NMPC), 期望以最小化控制误差的方式实现一种尾部驱动机器鱼的航向控制, 但 NMPC 的计算复杂度较大, 且依赖于仿生鱼模型的精度, 因此在试验中表现较差。Pan 等^[13]提出了一种基于模糊逻辑的线性模型预测控制方法, 实现了对所设计仿生机器鱼的航向控制器, 并通过数值仿真验证了所设计控制器的有效性, 该方法同样依赖于仿生鱼模型,

但精确的仿生鱼模型很难建立, 此外, 控制算法的有效性只通过了仿真验证, 还未进行实际的试验验证。因此, 需要发展抗扰能力强的无模型控制方法来实现扰动环境下难以精确建模的仿生鱼精确航向控制。

为使仿生䲟鱼拥有吸附功能, 一个可靠而稳定的吸附系统非常重要。动物或植物的吸附结构在自然界中很常见, 如弹涂鱼的吸盘、鲍鱼的脚足、章鱼的吸盘等。受这些结构的启发, 人们开发了一系列的吸附系统^[14-16]。䲟鱼吸盘由于其复杂的内部结构和高吸附性能, 被人们用于研究和模仿。Wang 等^[5]设计了第1个仿生物䲟鱼吸盘, 该吸盘基于对䲟鱼吸盘详细的形态学和运动学研究, 可以在一定的压力和剪切力下附着于不同的表面。然而, 由于缺乏吸附力增强模块和感知模块, 上述吸附系统均具有需要较大的预紧力以及缺乏感知能力的缺点。

针对现有的三维运动结构和吸附系统难以简单、高效地实现仿生䲟鱼自主吸附的问题, 本文拟设计一种能够实现三维解耦运动、垂向运动响应速度快以及具有可靠吸附系统的仿生䲟鱼。首先, 采用线驱动鱼尾的推进结构实现高仿生度、高推进效率的游动姿态; 并基于胸鳍拍动实现响应速度快、与水平面运动解耦的垂向运动; 然后, 通过负压吸盘实现稳定、可靠且具有感知功能的吸附, 并通过中枢神经控制器(central pattern generator, CPG)和自抗扰(active disturbance rejection controller, ADRC)航向控制器完成仿生䲟鱼基本的运动控制和航向控制; 接着, 开展仿生䲟鱼三维解耦运动水池试验, 包括水平面游动试验、升潜试验以及航向控制试验, 用以验证所设计仿生䲟鱼的解耦运动性能, 并记录分析在不同胸鳍及尾鳍摆动幅值和摆动频率下仿生䲟鱼的游动速度与升潜速度; 最后, 通过综合评估, 得到仿生䲟鱼游动和升潜的最佳参数, 同时进行 ADRC 航向控制器与 PID 航向控制器的对比试验, 验证所设计 ADRC 航向控制器的强抗扰能力和快速收敛能力。

1 仿生䲟鱼总体结构设计

如图1(a)所示, 仿生䲟鱼由刚性头部、胸鳍升潜结构、水密控制舱、吸附结构以及线驱动推进结构组成。得益于其流线型的外形设计, 仿生䲟鱼有着良好的阻力性能, 同时与生物䲟鱼一致, 将位于刚性头部底部的一对盆骨鳍设计充作减摇结构, 这样可大大减小机器鱼游动时产生的横摇。胸鳍升潜结构位于鱼体中部, 包含一对防水舵机和由舵机驱动的一对胸鳍。由于大多数电

子设备不具备防水和耐压特性,故此类设备均由O型圈密封于圆柱形密封舱中。此外,还设计了位于仿生䲟鱼顶部的吸附结构,该结构由吸盘、水泵以及流量传感器组成,可通过水泵改变吸盘内部水的体积而产生内外压差,从而实现吸附,其中吸盘由丁腈橡胶制成。线驱动推进结构由拉线机构、多个鱼尾关节、柔性脊柱、蒙皮以及末段尾鳍构成,其中蒙皮由液体硅胶凝结而成,用于减少外界的扰动和增加鱼尾推力;柔性脊柱由聚氨酯棒充当,蒙皮和尾鳍则由液体硅胶在模具中凝结而成。线驱动鱼尾通过第1鱼尾关节与刚性头部连接,尾鳍则与最后一节鱼尾关节连接。在仿生䲟鱼结构设计中,所有的结构件,例如刚性头部、胸鳍、鱼尾关节等均由光敏树脂3D打印而成,这种材料质量较轻且防水,能够较好地满足仿生䲟鱼的结构强度和防水要求。搭建的仿生䲟鱼实体结构如图1(b)所示。

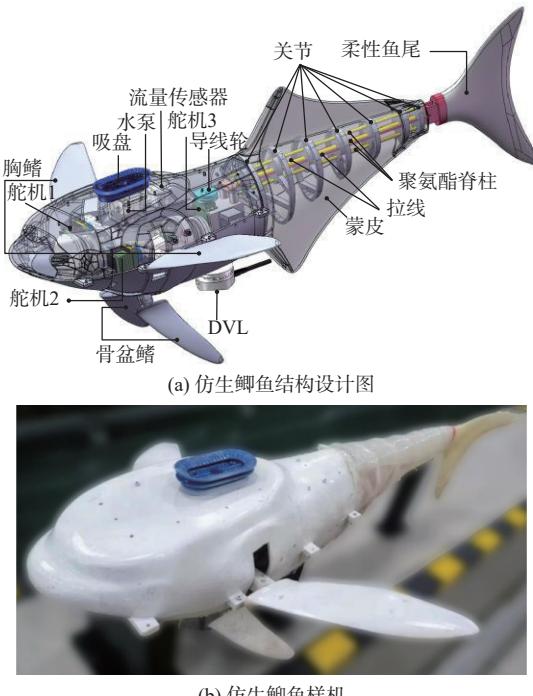


图1 仿生䲟鱼

Fig. 1 Overview of biomimetic robotic remora

仿生䲟鱼电气设计框架如图2所示。由于控制舱内部体积较小,故设计了一块以STM32F103为主控芯片,包含多个舵机驱动模块以及降压模块的STM32驱动板,其功能是接收和处理传感器传回来的运动数据(航向角、速度、位置),并通过脉宽调制(pulse width modulation, PWM)信号发生器驱动舵机,从而实现对应的游动姿态。仿生䲟鱼的传感器主要包括惯性导航(inertial navigation unit, IMU)、多普勒速度仪(doppler velocity log, DVL)、深度传感器和流量传感器。

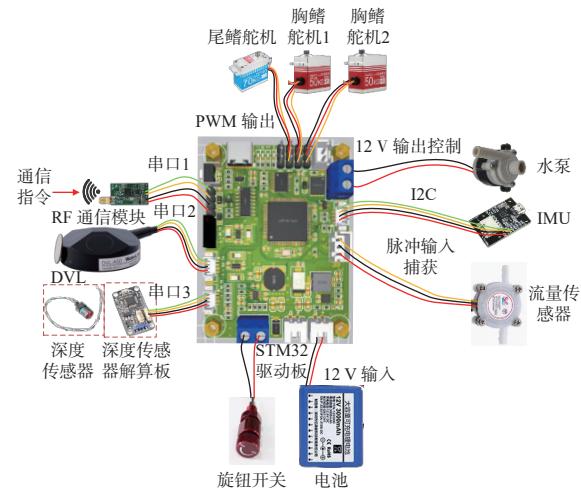


图2 仿生䲟鱼电气设计框架图

Fig. 2 Electronic design framework of biomimetic robotic remora

由IMU可以得到仿生䲟鱼实时的航向角,通过该数据,可以实现仿生䲟鱼的航向控制;DVL则通过发送和接收4个窄波束声波,经过处理后即可得到仿生䲟鱼的速度和位置信息;深度传感器通过检测环境压力来计算实时深度;流量传感器则通过检测流量大小来判断是否实现吸附,当液体通过流量传感器时,流量传感器向STM32发送一定频率的方波,捕获此方波,即可得到吸盘的吸附状态。仿生䲟鱼通过2.4 G射频模块与上位机进行通信,基于2.4 G频段的强穿透性特点,可以实现在水下1.2 m以内的数据传输。同时设计上位机软件,以实时观测仿生䲟鱼的运动数据,方便试验调试。仿生䲟鱼机械参数的规格如表1所示。

表1 仿生䲟鱼机械参数的规格

Table 1 Specification of mechanical parameters for biomimetic robotic remora

参数	规格
几何尺寸/mm	1 060×228×220
总质量/kg	5.3
控制芯片	STM32F103
电池	12.6 VDC 3 000 mAH 锂电池
舵机	尾鳍舵机(70 kgf·cm), 1个 胸鳍舵机(50 kgf·cm), 2个
水泵	XinKe Mini2
传感器	压力传感器(MS5837-30BA) IMU(JY901S) DVL(The WaterLink A50) 流量传感器(YF-S401)
通信模块	HD-M805

2 仿生䲟鱼运动结构设计

仿生䲟鱼的游动是通过模拟鱼类的游动机理

来实现的。现实中,鱼类是采用身体/尾鳍推进 (body and/or caudal fin propulsion, BCF) 模式, 通过波动、摆动部分鱼体躯体和尾鳍, 利用尾鳍的波动产生尾部涡流形成反卡门涡街, 在运动的反方向形成射流, 从而产生鱼类前进的动力。而仿生䲟鱼的线驱动推进结构是采用3个聚氨酯棒模拟鱼的脊椎骨, 利用拉线模拟鱼类游动时的肌肉, 通过一个舵机使不可延伸的拉线产生运动, 由于拉线的另一端固定于尾鳍, 一端拉线的长度缩短, 同时另一端拉线就会被拉长, 从而使鱼尾结构来回摆动, 产生尾部涡流, 进而生成仿生机器鱼前进的推力。

线驱动推进结构包括主动的鱼尾结构和从动的柔性尾鳍^[17]。主动鱼尾总长40 cm, 由7个鱼尾关节组成, 并由一根不可延伸的拉线通过一个舵机驱动。为防止鱼尾结构的滚动, 所有关节由1根半径为10 mm的主脊柱和半径为6 mm的2根次脊柱连接。所有脊柱均由聚氨酯制成。当舵机驱动拉线运动时, 一端拉线的长度缩短, 另一端的拉线同时会被拉长, 从而使鱼尾结构呈现“C”形状, 随着舵机持续来回运动, 鱼尾实现“C”形运动。为增加推进效率, 尾鳍由液体硅胶在模具上凝结而成。当鱼尾结构摆动时, 由于水的阻力和尾鳍的柔软性质, 会导致尾鳍产生变形与滞后, 使得原本的“C”形运动转换为推进效率更高的“S”形运动, 从而实现高效的波形运动。

为实现响应速度快且不依赖推进结构的升潜

结构, 设计了一种新型的胸鳍升潜法, 即通过胸鳍上下摆动的速度差来实现升潜。当胸鳍上下摆动时, 流体会产生一个垂直于胸鳍运动方向的阻力, 从而使仿生䲟鱼朝着与胸鳍运动方向相反的方向运动。该阻力计算公式为

$$F_f = 0.5C_f \rho v^2 S \quad (1)$$

式中: F_f 为胸鳍拍动时所受阻力; C_f 为胸鳍的阻力系数; ρ 为水的密度; v 为胸鳍拍动的速度; S 为胸鳍湿面积。

因此, 升潜速度与胸鳍面积和摆动速度有关。仿生䲟鱼胸鳍的面积为165 cm², 能够提供足够的阻力用于升潜。当仿生䲟鱼升潜时, 胸鳍做正弦周期摆动。仿生䲟鱼胸鳍升潜结构的原理如图3所示。在仿生䲟鱼上浮过程中, 将胸鳍一次上下摆动看作一次运动周期, 当胸鳍向上摆动时, 仿生䲟鱼下潜; 当胸鳍向下摆动时, 仿生䲟鱼上浮, 由于胸鳍向下摆动的角速度 ω_f 大于向上摆动的角速度 ω_s , 使上升力 F_u 大于下潜力 F_d , 因此在一个上浮周期内, 仿生䲟鱼总体为上浮运动。由于升潜速度与胸鳍拍动速度相关, 因此, 当仿生䲟鱼上下摆动的速度差较大时, 上浮下潜的响应速度也更快, 通过该方式, 可以实现响应速度快且与水平面运动解耦的升潜运动。

3 吸附系统设计

自然界中机器鱼主要是依靠其独特的吸盘来

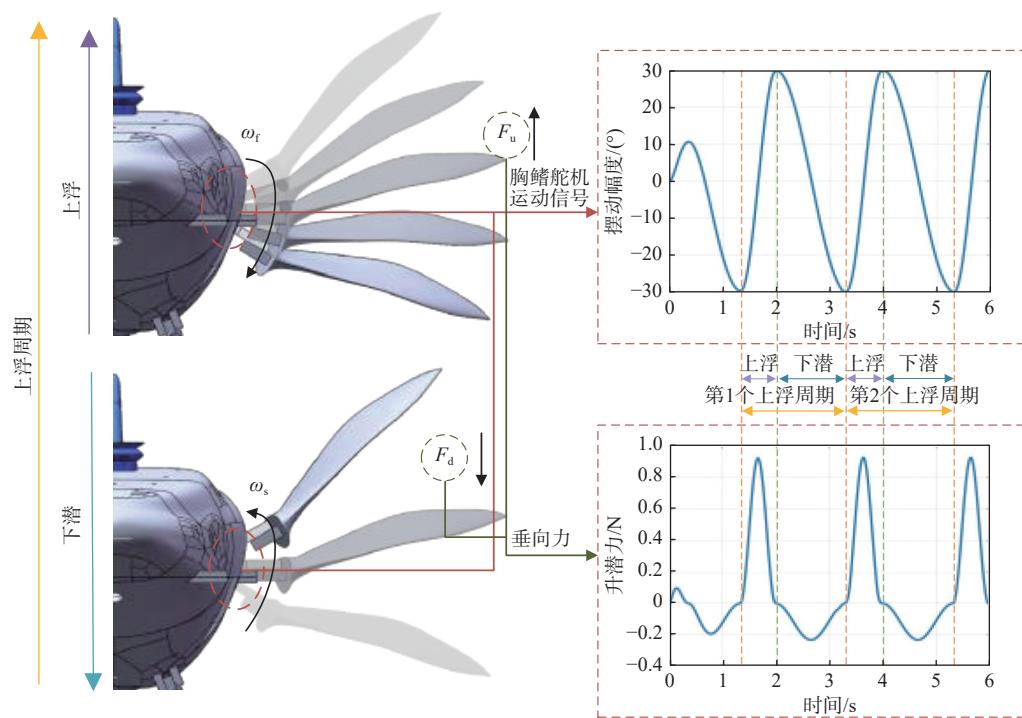


图3 仿生䲟鱼胸鳍升潜结构原理图

Fig. 3 The principle diagram of pectoral fins ascending and descending mechanism of biomimetic robotic remora

实现其“搭便车”机制,而一个具备较好性能的吸附系统是成功实现“搭便车”功能的关键。因此,设计了一种具有重复吸附能力、低预紧力需求、较大的吸附力、快速吸附能力、低能耗以及感知能力的吸附系统,以实现稳定、可靠的吸附。

重复吸附能力使仿生机器鱼能够吸附于不同的宿主。图4展示了吸附系统的吸附过程。在吸附阶段,得益于升潜系统提供的足够大的预紧力,吸盘能够紧紧依附于被吸附物表面,形成一个面积较小的封闭空间。此时,水泵开始工作,使封闭空间内的液体从内部流动到外部水池中从而产生内外压差。当所有液体流动到外界水池后,吸盘就能完全吸附于被吸附物表面,整个吸附过程结束。相反,当处于脱离阶段时,水泵停止工作,液体回流入吸盘内部,同时升潜结构向下运动破坏负压环境,从而实现脱离任务。

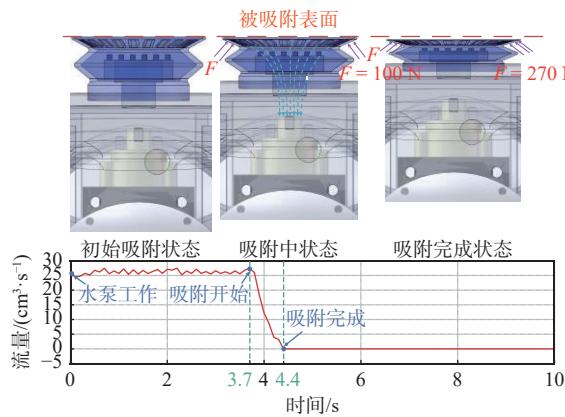


图4 仿生䲟鱼吸附原理

Fig. 4 Adhesion mechanism of biomimetic robotic remora

吸附力大小和吸附速度与水泵及吸盘的特性密切相关。水泵选择具有1.2 m扬程的增压泵,吸盘选择由丁腈丁二烯橡胶(nitrile butadiene rubber, NBR)制成的双层吸盘。得益于水泵的高扬程和吸盘的小吸附面积,吸附系统能够在1 s内产生最大274 N的吸附压力和170 N的剪切力。考虑了仿生机器鱼的自身重量,即使在机器鱼经历5倍重力加速度的运动下,该吸附力也能保证可靠的吸附,完全能够满足仿生机器鱼吸附于宿主上协同的需求。

在仿生鱼成功吸附于宿主并被宿主带着运动时,仿生鱼仅吸附系统在工作,与仿生鱼单独游动相比,此时仿生机器鱼的能耗从24 W降至4.2 W,续航能力显著提高。对仿生鱼来说,感知能力同样重要,因其可以反馈仿生机器鱼的吸附状态并提示其进行下一步动作。当水流通过时,流量传感器会将流速值发送到内部电路板,如图4所示,当吸附完全实现时,流速将在1 s内降至0。因此,升潜结构和推进结构可以通过流量

传感器发送的流速变化来决定是否停止工作。

4 运动控制算法设计

为模拟真实鱼类的游动,仿生䲟鱼的胸鳍和尾鳍运动均采用CPG控制。CPG是一种仿生运动控制方法,可增强仿生机器鱼游动、升潜时的仿生程度,同时在姿态转换,如直行模式切换转向模式、上浮模式切换下潜模式时具有较大的优势^[2]。仿生䲟鱼的鱼鳍采用Ijspeert's CPG模型^[18],其被广泛应用于单舵机驱动鱼尾控制,通过设置摆动幅值、摆动频率、偏移角度和时间比率这4个参数,即可控制机器鱼的游动姿态。模型描述如下:

$$\ddot{b} = k_b(0.25k_b(B-b) - \dot{b}) \quad (2)$$

$$\ddot{m} = k_m(0.25k_m(M-m) - \dot{m}) \quad (3)$$

$$\dot{\phi} = [(1+R)^2/4R - (R^2-1)/4R\text{sign}(\sin\phi)]\omega \quad (4)$$

$$a = b + m\cos(\phi) \quad (5)$$

式中: b 为CPG信号的偏移状态; B 为期望的偏移角度; k_b 为一决定 b 收敛于 B 速度的正值参数; m 为幅值状态; M 为期望的幅值; k_m 为决定 m 收敛于 M 速度的正值参数; ϕ 为相位状态; ω 为期望的角速度; R 为CPG信号一次上升和一次下降的时间比率; $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数。鱼鳍的CPG信号如图5所示。

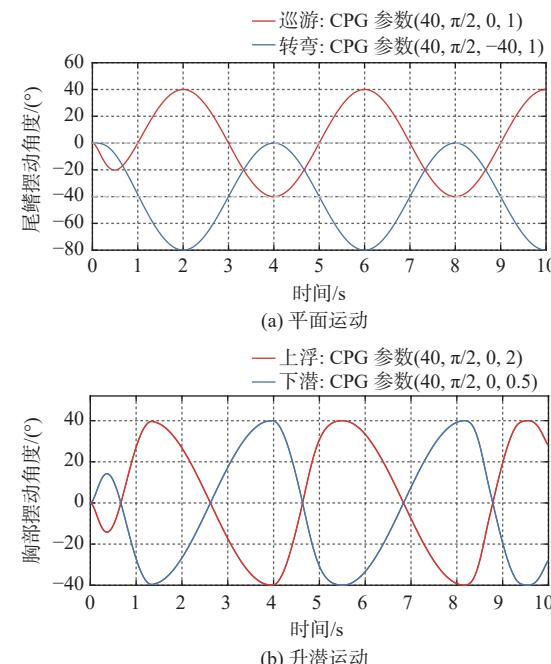


图5 仿生䲟鱼运动 CPG 信号

Fig. 5 The motion CPG signal of biomimetic robotic remora

仿生䲟鱼巡游的速度与CPG信号中的幅值 M 和角速度 ω 有关,幅值 M 和角速度 ω 越大,仿生机

器鱼理论巡游的速度越大。转向模式则与偏移角度 B 有关,当偏移角度 $B > 0$ 时,实现右转动作,反之,当偏移角度 $B < 0$ 时,实现左转动作。升潜速度与时间比率 R 相关,时间比率 R 越大,上下摆动速度差越大,则理论升潜速度也越快。因此,分别通过胸鳍和尾鳍的 4 个 CPG 参数(M, ω, B, R),即可实现仿生度较高的运动姿态控制以及平滑的姿态转换。

考虑到仿生䲟鱼是一个高度非线性且模型不确定的控制系统,以及内部控制板计算负载和鱼鳍带来的扰动问题,设计了基于 ADRC 的航向控制器^[19]。该控制器以期望航向为输入,输出偏移角度 B 至尾鳍 CPG 模型中,即可得到对应的尾鳍舵机转向角,实现对仿生䲟鱼的航向控制。其中,尾鳍 CPG 模型中其余的参数(M, ω, R)均设置为固定值。ADRC 航向控制器结构如图 6 所示,主要包括以下 3 个部分。

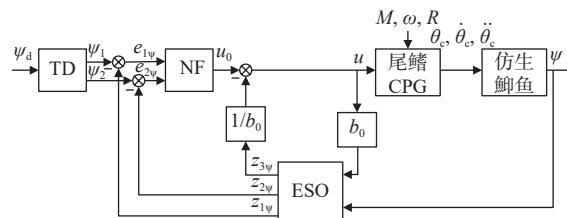


图 6 自抗扰航向控制器结构图

Fig. 6 Structure of active disturbance rejection heading controller

1) 跟踪微分器 (tracking differentiator, TD) 部分。微分环节的噪声放大效应使得传统 PID 控制器对环境噪声较为敏感, TD 部分可代替微分环节, 减少环境噪声带来的影响。以期望航向 ψ_d 为输入, TD 定义如下:

$$\begin{cases} \psi_1(t+1) = \psi_1(t) + T \cdot \psi_2(t) \\ \psi_2(t+1) = \psi_2(t) + T \cdot \text{fst}(\psi_1(t) - \psi_d(t), \psi_2(t), r, h_0) \end{cases} \quad (6)$$

式中: ψ_1 为 ψ_d 的跟踪信号; ψ_2 为 ψ_1 的微分信号; t 为观测时刻; T 为采样时间; r 为决定信号跟踪速度的快速因子; h_0 为噪声的滤波因子; $\text{fst}(\cdot)$ 为避免稳态抖震现象的最优控制函数, 该函数的定义如下:

$$\begin{aligned} d &= rh_0^2 \\ a_0 &= h_0\psi_2 \\ y_a &= \psi_1 - \psi_d + a_0 \\ a_1 &= \sqrt{d(d+8|y_a|)} \\ a_2 &= a_0 + \text{sign}(y_a)(a_1 - d)/2 \\ s_y &= (\text{sign}(y_a + d) - \text{sign}(y_a - d))/2 \\ s_a &= (\text{sign}(a + d) - \text{sign}(a - d))/2 \\ a &= (a_0 + y_a)s_y + a_2(1 - s_y) \\ f &= -r\left(\frac{a}{d}\right)s_a - r\text{sign}(a)(1 - s_a) \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数。

2) 扩张观测器 (extended state observer, ESO) 部分。该部分估计影响输出的扰动, 并将这部分扰动看作控制系统的补偿以消除扰动。通过该方法, 使控制速度与超调之间能够平衡。ESO 部分的表达式如下:

$$\begin{cases} e(t) = z_{1\psi}(t) - \psi(t) \\ z_{1\psi}(t+1) = z_{1\psi}(t) + T(z_{2\psi}(t) - \beta_{01}e(t)) \\ z_{2\psi}(t+1) = z_{2\psi}(t) + T(z_{3\psi}(t) - \beta_{02}e(t) + b_0u(t)) \\ z_{3\psi}(t+1) = z_{3\psi}(t) + T(-\beta_{03}e(t)) \end{cases} \quad (8)$$

式中: e 为期望航向角与实际航向角之间的差值; $z_{1\psi}, z_{2\psi}$ 分别为 ψ_1 和 ψ_2 的观测信号; $z_{3\psi}$ 为系统的外部扰动; $\beta_0 = [\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}]^T$, 为观测器增益; b_0 为输出补偿因子; u 为期望偏移角度。

3) 非线性反馈 (nonlinear feedback, NF) 部分。该部分通过非线性反馈提高控制稳定性, 其本质为一个 PD 控制器。NF 部分的表达式如下:

$$u_0 = k_{p\psi}e_{1\psi} + k_{d\psi}e_{2\psi} \quad (9)$$

式中: $k_{p\psi}$ 和 $k_{d\psi}$ 分别为比例和微分增益; $e_{1\psi} = \psi_1 - z_{1\psi}$, 为期望航向角与其估计值的差值; $e_{2\psi} = \psi_2 - z_{2\psi}$, 为期望航向角的微分信号与其估计值的差值。

因此, 尾鳍偏移角度 u 的表达式为

$$u = u_0 - z_{3\psi}/b_0 \quad (10)$$

式中, u_0 为 NF 部分的输出。

得到尾鳍偏移角度后, 输入到尾鳍 CPG 模型中, 尾鳍 CPG 输出尾鳍舵机角度规律 $\theta_c, \dot{\theta}_c, \ddot{\theta}_c$ 至仿生䲟鱼, 使其产生相应的游动姿态, 然后通过 IMU 返回实时航向 ψ 至 ESO, 完成整个 ADRC 航向控制器的闭环。

5 仿生䲟鱼三维解耦运动试验

5.1 试验环境说明

为了测试仿生䲟鱼实体的三维解耦运动性能, 以及所设计航向控制器的控制性能, 在 $10 \text{ m} \times 2.5 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的静水池中开展了仿生䲟鱼的游动、升潜和航向控制试验。仿生䲟鱼通过搭载的射频模块与上位机通信, 并以 5 Hz 的频率返回运动数据(速度、位移以及角度)。其中, 仿生䲟鱼的水平速度信息和水平位置信息由 DVL 提供, 深度信息由深度传感器提供, 角度信息则由 IMU 提供, DVL 和深度传感器的更新频率为 5 Hz, IMU 的更新频率为 50 Hz。水平面试验通过 DJI Mini3 记录, 深度方向的试验则使用 GoPro Hero9 记录。

5.2 仿生䲟鱼游动试验

仿生䲟鱼通过尾鳍的摆动实现游动姿态, 其游动速度与CPG参数中的摆动幅值 M 和摆动角速度 ω 有关, 因此, 固定偏移角度为0, 固定时间比率为1, 改变鱼尾摆动幅值和频率, 进行了25组独立实验。其中, 鱼尾摆动幅值为 $30^\circ\sim70^\circ$, 频率改变范围为 $0\sim1\text{ Hz}$, 试验中机器鱼的初始速度为0, 通过DVL(型号为The WaterLink A50)记录仿生䲟鱼的游动速度, 其速度测量精度为 0.001 m/s 。由于仿生䲟鱼的运动是节律运动, 故其速度呈波形摆动, 因此, 最后记录的数据为速度稳定后的均值。以摆动幅值 40° 、摆动频率 0.6 Hz 试验为例, 仿生䲟鱼 25 s 内游动的速度如图7所示。

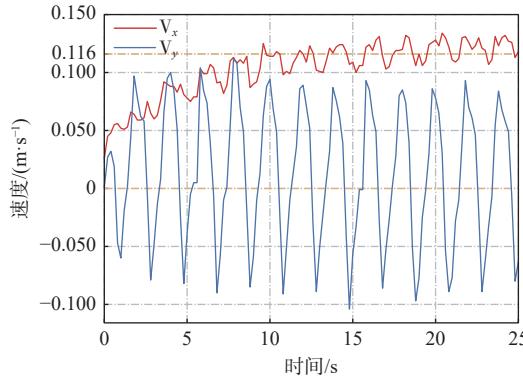


图7 典型试验下的速度曲线

Fig. 7 Velocity curves under typical test conditions

由图7可以看出, X 、 Y 方向的速度皆呈波形上下波动, 其中 X 方向的速度 V_x 在 15 s 后绕着 0.116 m/s 波动, 由于摆动偏移角度 B 设置为 0° , Y 方向的速度 V_y 绕着 0 m/s 波动。仿生䲟鱼实际游动速度为 X 、 Y 方向速度之和, 由此可以得出, 在该参数下仿生䲟鱼的游动速度为 0.116 m/s 。同理, 可测试得到尾鳍在不同摆动幅值和摆动频率下仿生䲟鱼的游动速度。

从图8中可以看出, 仿生䲟鱼最大的游动速度为 0.17 m/s , 该游动速度的记录方法为: 设置CPG参数为 $(60, 0.8, 1, 0)$, 通过DVL以 5 Hz 的频率记录速度数据, 在仿生䲟鱼速度稳定后, 计算仿生䲟鱼的稳定速度平均值以作为最终的游动速度。同理, 可得最低游动速度为 0.01 m/s , 这是因为在摆动频率和幅值均较小的情况下, 不能产生足够的尾流推力来使仿生䲟鱼游动。同时, 从图中也可以看出, 尾鳍摆动频率和摆动幅值均对游动速度有较大影响。在摆动频率方面, 随着摆动频率的升高, 其游动速度呈二次函数的形式; 当摆动频率大于 0.8 Hz 时, 游动速度呈下降趋势, 这是因为当摆动频率过大时, 受尾鳍舵机的转矩限制

和尾鳍3个脊柱刚度的限制, 导致在该摆动频率下的摆动幅值小于理想幅值, 从而造成游动速度下降。

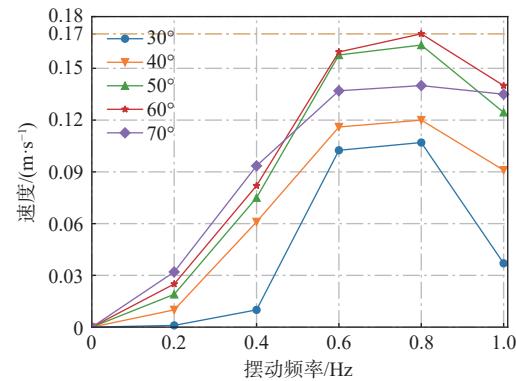


图8 水平面游动试验曲线

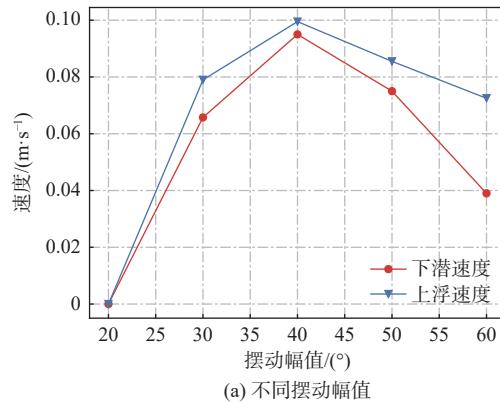
Fig. 8 Swimming test curves on the horizontal plane

在摆动幅值方面, 游动速度是随摆动幅值的增加而增加的, 但当摆动幅值大于 60° 时, 继续增大摆动幅值游动速度反而会减小, 这是因为当摆动幅值为 60° 时, 仿生䲟鱼的水动力设计已经到达极限, 若超过该摆动幅值, 仿生䲟鱼的驱动结构将无法实现理想的摆动模式。

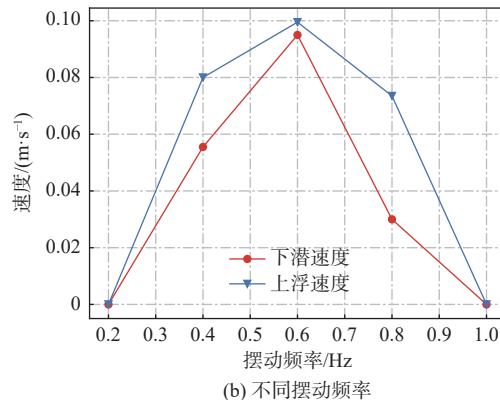
5.3 仿生䲟鱼升潜试验

仿生䲟鱼通过胸鳍上下摆动的速度差来产生升潜力, 从而实现升潜运动。其升潜速度与胸鳍拍动时间比率、频率以及幅值相关, 因此, 固定其中的2个值, 改变剩余的1个值, 进行15次独立实验。在整个实验过程中, 仿生䲟鱼的浮力设置为略大于重力, 以使仿生䲟鱼在能够完全浸没于水中的同时避免静止时下沉, 从而减少浮力对升潜试验的影响。同时, 采用深度传感器记录机器鱼垂向移动的距离, 深度传感器使用MS5837-30BA型高分辨率水深传感器, 其量程可达 3 MPa (约 300 m 水深), 水深测量精度为 0.002 m 。最后, 通过微分求解得到最终的上浮和下潜速度。其中, 胸鳍拍动时间比率为 $1.5\sim5$, 频率以及幅值变化范围分别为 $0.2\sim1\text{ Hz}$ 和 $20^\circ\sim60^\circ$ 。得到不同参数下仿生䲟鱼升潜速度曲线如图9所示。

从图9中可以看出, 3个不同的参数对升潜速度的影响均呈现二次函数形式。值得注意的是, 当速度为0时, 表示仿生䲟鱼未能成功下潜。升潜速度最大时CPG参数为 $(40, 0.6, 0, 3)$, 速度分别为 0.095 和 0.0995 m/s 。当摆动幅值、摆动频率以及时间比率这3个参数分别大于 40 、 0.6 和 3 时, 速度出现下降, 这是因为此时胸鳍拍动会对仿生䲟鱼水平面运动产生较明显的影响。受胸鳍连接结构件的刚度限制, 当摆动频率和幅值较大



(a) 不同摆动幅值



(b) 不同摆动频率

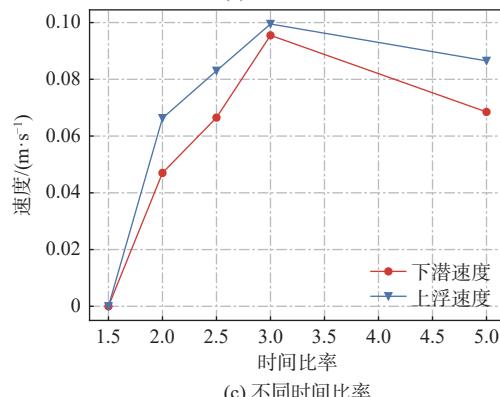


图9 升潜速度曲线

Fig. 9 The curves of ascending and descending velocity

时,胸鳍末端运动方向会发生改变,使得摆动方向与水平面有一定的角度,从而生成一定的水平推力,产生水平面位移,进而影响垂向升潜速度,这种情况不利于三维运动的解耦。此外,因仿生䲟鱼初始处于微正浮力状态,导致上浮速度皆大于下潜速度。仿生䲟鱼下潜运动图如图10所示。



图10 仿生䲟鱼下潜试验图

Fig. 10 Snapshots of descending test of biomimetic robotic remora

5.4 仿生䲟鱼航向控制试验

为了验证仿生䲟鱼系统的可控性以及所设计控制算法的有效性,对仿生䲟鱼进行了航向控制试验。在该试验中,为尽可能减少仿生机器鱼摆动带来的扰动,其实时航向由安装于机器鱼中部的IMU以50 Hz的频率采集。通过前面不同CPG参数下的游动试验数据,可得出最大速度下的CPG参数为(40, 0.8, 0, 1),但考虑到在该CPG参数下舵机性能处于较大负载状态,同时过高的摆动频率会影响控制系统的稳定性,因此最后选择CPG参数为(40, 0.6, B, 1),其中B为控制量。为了验证ADRC航向控制器的性能,还设计了基于PID航向控制器的试验作为对比。设置初始航向为0°,期望航向 $\psi_d = 45^\circ$ 和90°,仿生䲟鱼在期望航向 $\psi_d = 90^\circ$ 时的航向控制试验如图11所示。航向控制曲线如图12所示。

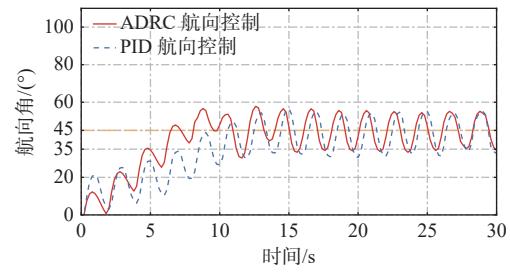
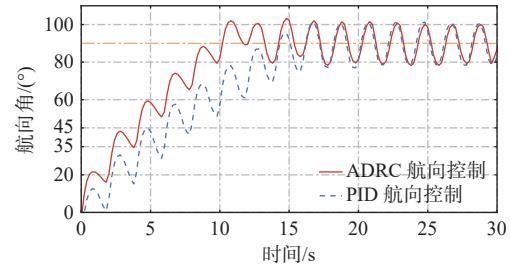
图11 $\psi_d = 90^\circ$ 时航向控制试验图Fig. 11 Snapshots of the heading control test when $\psi_d = 90^\circ$ (a) $\psi_d = 45^\circ$ (b) $\psi_d = 90^\circ$

图12 航向控制曲线

Fig. 12 The heading control curves

从图12中可以看出,在2种控制方法下,仿生䲟鱼皆实现了快速且稳态误差较小的航向控制。当期望航向 $\psi_d = 45^\circ$ 和90°时,在ADRC航向控制器的作用下,仿生䲟鱼分别在8 s后实现了

稳态误差为 0.32°的稳定航向控制和在 10 s 后实现了稳态误差为 0.33°的稳定航向控制；而在 PID 控制器的作用下，仿生䲟鱼分别在 13 s 后实现了稳态误差为 0.96°的航向控制和在 15 s 后实现了稳态误差为 1.03°的航向控制。可见 ADRC 航向控制器的响应速度较 PID 航向控制器快，且在扰动下其稳态误差低于 PID 航向控制器，证明所设计 ADRC 航向控制器的鲁棒性和快速响应性均优于 PID 航向控制器，具有抗扰能力强、收敛速度快、控制精度高的优点。试验中，ADRC 控制器的参数如表 2 所示，其中参数整定方法参照 Gao^[20]提出的方法。PID 控制参数为： $k_{p\psi} = 100$ ， $k_{i\psi} = 200$ ， $k_{d\psi} = 0$ ，其中 $k_{p\psi}$ ， $k_{i\psi}$ ， $k_{d\psi}$ 分别为 PID 控制器中的比例、积分和微分系数。

表 2 ADRC 控制器参数

Table 2 The parameters of ADRC controller

参数	数值	参数	数值
r	150	b	350
h_0	0.08	β_{01}	30
T	0.02	β_{02}	300
$k_{p\psi}$	2.5	β_{03}	1 000
$k_{d\psi}$	0.1		

6 结 语

本文以生物䲟鱼为原型，设计了一种具有高机动性、水平与垂向运动解耦特性以及可靠吸附系统的新型仿生䲟鱼，并完成了样机制作。针对传统仿生鱼的三维运动结构不能兼具响应速度快、垂直面和水平面运动解耦的问题，提出了线驱动鱼尾与胸鳍相结合的三维运动结构。在水平面，采用线驱动推进结构，配合柔性鱼尾，可以实现仿生度高、游动效率高的游动姿态；在垂直面，则基于胸鳍上下拍动的速度差来实现升潜。该结构具有设计简便、响应速度快且无需与游动结构相配合的优点。

采用 CPG 模型调节胸鳍和尾鳍的周期性摆动，可提高仿生䲟鱼游动时的稳定性和姿态转换的平滑性。设计 ADRC-CPG 航向控制器，实现了仿生䲟鱼鲁棒、快速、精确的航向控制。最后，还在水池中进行了仿生䲟鱼的游动、升潜以及航向控制试验，验证了仿生䲟鱼的三维运动解耦能力、垂向运动快速响应能力以及航向精确快速控制能力。

此外，游动试验还表明，在一定范围内，增大仿生䲟鱼尾鳍摆动幅值和频率可增大游动速度，

但受舵机转矩和鱼尾支撑脊柱刚度的限制，导致在摆动频率大于 0.8 Hz 时游动速度反而下降，最后，测得仿生䲟鱼最大游动速度为 0.17 m/s。升潜试验表明，仿生䲟鱼的升潜速度与胸鳍拍动幅值、频率以及时间比率相关，在一定范围内，升潜速度随幅值、频率以及时间比率这 3 个参数的增加而增加。胸鳍拍动速度或频率过大时会使仿生䲟鱼产生较大的水平面位移，造成升潜速度在大摆动速度和频率时反而减小，到一定程度时甚至无法下潜。经试验，得到最大升潜速度分别为 0.095 和 0.099 5 m/s。航向控制试验表明，在尾鳍摆动扰动下，所设计的 ADRC 控制器在鲁棒性和快速响应性方面要优于 PID 控制器。

本文工作为仿生䲟鱼后续实现自主吸附奠定了有力的基础。所设计的仿生䲟鱼未来可搭载海洋探测设备配合无人船进行海底地形探测；可搭载探矿设备配合水下航行器进行深海矿产探测；也可搭载摄像头吸附于海洋生物进行近距离生物观测，在异构体协同方面具有广阔的应用前景。

参 考 文 献：

- [1] 郭松子, 马俊, 李志印, 等. 拍动式仿䲟鱼水下机器人设计及其游动性能试验 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(4): 139–144.
GUO S Z, MA J, LI Z Y, et al. Design and swimming test of myliobatid-inspired robot[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(4): 139–144 (in both Chinese and English).
- [2] 王文谦, 马鹏磊, 李广浩, 等. 仿生机器鱼步态控制及闭环运动控制方法综述 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(1): 29–45.
WANG W Q, MA P L, LI G H, et al. Review of gait control and closed-loop motion control methods for bionic robotic fish[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(1): 29–45 (in Chinese).
- [3] TAN T, YU L, GUO K, et al. Biomimetic robotic remora with hitchhiking ability: design, control and experiment [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024, 9(12): 11505–11512.
- [4] ZHANG P F, WU Z X, CHEN D, et al. Autonomous dynamic hitch-hiking control of a bionic robotic remora [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(3): 2893–2902.
- [5] WANG Y P, YANG X B, CHEN Y F, et al. A bio-robotic adhesive disc for underwater hitchhiking inspired by the remora suckerfish[J]. Science Robotics, 2017, 2(10): eaan8072.
- [6] ZHONG Y, LI Z, DU R X. A novel robot fish with wire-driven active body and compliant tail[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(4): 1633–1643.
- [7] ZHANG S W, QIAN Y, LIAO P, et al. Design and con-

- trol of an agile robotic fish with integrative biomimetic mechanisms[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(4): 1846–1857.
- [8] DAI S J, WU Z X, WANG J, et al. Barrier-based adaptive line-of-sight 3-D path-following system for a multi-joint robotic fish with sideslip compensation[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2023, 53(7): 4204–4217.
- [9] ZHANG P F, WU Z X, MENG Y, et al. Development and control of a bioinspired robotic remora for hitchhiking[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(5): 2852–2862.
- [10] WANG J, WU Z X, TAN M, et al. 3-D path planning with multiple motions for a gliding robotic dolphin[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(5): 2904–2915.
- [11] MORGANSEN K A, TRIPLETT B I, KLEIN D J. Geometric methods for modeling and control of free-swimming fin-actuated underwater vehicles[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(6): 1184–1199.
- [12] CASTAÑO M L, TAN X B. Model predictive control-based path-following for tail-actuated robotic fish[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2019, 141(7): 071012.
- [13] PAN J, LIU J C, YU J Z. Path-following control of an amphibious robotic fish using fuzzy-linear model predictive control approach[C]//2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Beijing, China: IEEE, 2020: 886–891.
- [14] SANDOVAL J A, JADHAV S, QUAN H C, et al. Reversible adhesion to rough surfaces both in and out of water, inspired by the clingfish suction disc[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2019, 14(6): 066016.
- [15] HWANG G W, LEE H J, KIM D W, et al. Soft micro-denticles on artificial octopus sucker enable extraordinary adaptability and wet adhesion on diverse nonflat surfaces [J]. *Advanced Science*, 2022, 9(31): 2202978.
- [16] LIN A Y M, BRUNNER R, CHEN P Y, et al. Underwater adhesion of abalone: the role of van der Waals and capillary forces[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(14): 4178–4185.
- [17] CHEN Z G, TIAN X L, CHEN X, et al. An experimental study of the wire-driven compliant robotic fish[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 279: 114433.
- [18] XIE F R, ZHONG Y, DU R X, et al. Central pattern generator (CPG) control of a biomimetic robot fish for multimodal swimming[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2019, 16(2): 222–234.
- [19] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900–906.
- [20] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference. Denver, CO: IEEE, 2003: 4989–4996.

Design and three-dimensional decoupled motion control study of bio-inspired robotic remora

TAN Tong, YU Lin, GUO Kai, WANG Xuyang, QIAO Lei*

School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: [**Objective**] Inspired by remora, a robotic remora that can adhere to diverse hosts and travel with them over long distances with low energy consumption due to its unique adhesion ability, addresses the issue of low endurance in the robotic fish. [**Methods**] A prototype with decoupled three-dimensional motion, high mobility, and responsive vertical motion has been developed. Moreover, a wire-driven propulsion mechanism and a pectoral fin ascending and descending mechanism have been adopted to achieve high mobility and decoupled motion. Additionally, a central pattern generator (CPG) is adopted to realize high biomimetic swimming postures and smooth switching between motion modes. An active disturbance rejection controller (ADRC) is developed to achieve robust, fast and precise heading control under model uncertainty and the environment disturbance. The swimming, diving and heading control experiments are conducted. [**Results**] The results exhibits that the designed robotic remora owns the high mobility and responsive decoupled motion capabilities, with the maximum swimming speed of 0.17 m/s and max ascent and descent speed of 0.095 and 0.099 5 m/s respectively. The designed ADRC heading controller can achieve fast and precise control, which is with better performance than the PID controller. [**Conclusion**] This study, which presents the design of the robotic remora and verifies the decoupled motion and the ADRC heading controller by experiments, lays the foundation for the auto adhesion of the robotic remora.

Key words: autonomous underwater vehicle; marine robot; robotic remora; 3D decoupled motion; heading control; motion performance