

# 小型单关节机器鱼设计与游动稳定性分析

谢智钧<sup>1</sup> 赵灿明<sup>1</sup> 柯鑫<sup>1</sup> 肖扬<sup>1</sup> 武静<sup>1,2</sup> 宋加雷<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>东莞理工学院 机械工程学院, 广东东莞 523808

<sup>2</sup>广东省城市生命线工程智慧防灾与应急技术重点实验室, 广东东莞 523808

**摘要:** 基于鲹科鱼的推进模式, 采用鱼鳍模块化设计, 设计了一款结构紧凑、成本低廉、高效游动的小型单关节仿生机器鱼, 可以方便地对胸鳍、腹鳍和尾鳍进行拆装, 对仿生机器鱼的直线推进、静止转弯、鱼头稳定性进行了水下实验, 从而研究胸鳍和腹鳍对游动性能的影响。在样机游动测试中, 采用了一台高速相机和一面平面镜构建的记录机器鱼运动的“双目视觉系统”, 可以对鱼头最前端以及质点上方两处标记点进行追踪并记录三维位置信息, 为机器鱼游动的游动性能、姿态变化以及头部稳定度的定量分析提供数据支持。结果表明: 机器鱼具有良好的直线推进性能和转弯性能; 在稳定性实验中装配上胸鳍和腹鳍的机器鱼头部稳定性在低频游动时更优, 而在高频游动时没有显示出优势, 这也和自然界中鱼类在高频游动时除尾鳍外的各种鳍紧贴身体的现象相一致。

**关键词:** 小型机器鱼; 单关节; 水下实验; 头部稳定性

**中图分类号:** TP242.6 **文献标志码:** A **doi:** 10.12146/j.issn.2095-3135.20240312002

## Design and Swimming Stability Analysis of Small Single-Joint Robotic Fish

**XIE Zhijun ZHAO Canming KE Xin XIAO Yang WU Jing SONG Jialei**

(School of Mechanical Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China;

Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Disaster Prevention and Emergency Technologies for Urban Lifeline Engineering, Dongguan 523808, China)

**Abstract** This paper presents a design of single-joint biomimetic robotic fish with compact structure and high swimming efficiency. It allows for convenient disassembly and assembly of pectoral fins, pelvic fins, and caudal fins. The influence of pectoral and pelvic fins on swimming performance was studied via underwater experiments. In the prototype swimming tests, a "binocular vision system" for tracking and recording the motion of the robotic fish was constructed using a high-speed camera and a flat mirror. It enabled tracking and recording of the three-dimensional position information of two marked points on the foremost end of the fish head and above its center of mass. This system provided data support for the quantitative analysis of the swimming performance, posture changes, and head stability of the robotic fish. The results

收稿日期: 2024-03-12 修回日期: 2024-04-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(12302296); 广东省自然科学基金面上项目(2023A1515011506); 广东省城市生命线工程智慧防灾与应急技术重点实验室项目(2022B1212010016); 东莞市科技特派员项目(20231800500632)。

作者简介: 谢智钧, 本科生, 主要从事仿生机器人设计与制造研究;

宋加雷, 博士, 特聘副教授, 主要从事动物运动机理和仿生机器人设计研究。

indicated that the robotic fish have good performance in linear propulsion and turning. In the stability experiments, the head stability of the robotic fish equipped with pectoral fins and pelvic fins is better during low-frequency swimming. But no advantage is shown during high-frequency swimming, which is consistent with the phenomenon of various fins of fish in the natural environment being close to the body during high-frequency swimming except for the caudal fin.

**Key words** small robotic fish;single joint;underwater experiment;head stability

## 1、引言

随着人类对海洋探索和开发的深入,传统的螺旋桨式水下推进器效率低、噪声高和机动性能差等缺陷显然已经不能满足日益多样的需求。为突破当今单一的运输方式和水下推进方式,利用鱼类的游动机理设计出效率高、能耗低、噪声低的水下推进器已成为热门研究课题<sup>[1]</sup>。现有的仿生机器鱼按照体型可以分为大型和小型两类。整体来看,大型机器鱼性能优秀,能够实现在水中的浮潜,在游动时保持流畅的曲线,通过搭载多类传感器实现复杂的特定工作<sup>[2]</sup>。但是,大型机器鱼设计复杂,拥有较高的时间及金钱成本,且由于体型过大,隐蔽性较差。相对于大型机器鱼,目前制成的小型机器鱼拥有体型小、隐蔽性好,结构简单,成本较低等优点,具备更好的机动性能和更快的反应性能<sup>[3-4]</sup>。

由于自然界中 90%以上鱼类采用身体-尾鳍波动推动的形式,因此该种形式的推进也是机器鱼经常采用的推进形式。在这种情况下,鱼或者机器鱼的纵向中心位置的数学模型为,  $h(x,t) = (a_0 + a_1x + a_2x^2)\sin(\omega t - kx)$ , 其中  $h$  为鱼体中心线的侧向移动,  $x$  为从鱼头到鱼尾的位置,  $a_0$ ,  $a_1$  和  $a_2$  为控制鱼体振幅的参数,  $k$  是与鱼体波长相关的参数,  $\omega$  为拍动角频率<sup>[5-6]</sup>。目前大部分机器鱼采用多关节多舵机串联驱动方式来实现波形运动,即一个电机驱动一个关节,控制每节鱼体关节的摆动角度和速度;或者通过线驱动,即一个电机控制一对线,以拟合鱼的游动鱼体曲线。吴文广<sup>[7]</sup>研制了基于仿生对象形态结构和运动形式的四关节仿生机器鱼,分析了机器鱼各运动学参数对机器鱼推进效率的影响情况。王飞<sup>[8]</sup>等人通过改变机器鱼摆动舵机的数量研制成单关节、双关节和三关节仿生机器鱼,论证了仿生机器鱼关节数目对机器鱼游动性能的影响,提出了仿生机器鱼关节数目和巡游速度的关系方程;杜如虚<sup>[9]</sup>等人则对其研制的基于拉线机构的机器鱼推进方式进行仿真分析和运动控制,发现其相比多关节多电机串联结构的机器鱼能更好地拟合理论上的鱼体干波曲线。Clapham<sup>[10]</sup>等人研制的 iSplash-I 机器鱼设计了一种适用于两种游姿的新型机械驱动系统,其提出的全身游动运动协调了前、中、后三个位置的位移,减少现有自由游动机器鱼的运动学误差,线性游泳速度与传统的尾部波浪推进相比,性能显著提高。这类方法能较好地模拟鱼类游动的姿态,前者随着关节数增多控制起来比较复杂,且功耗较高,后者则会增加机械的复杂性和控制难度。

在特定环境中,搭载视觉系统的仿生机器鱼通常协作工作人员完成水下探测任务。然而,由于视觉摄像头通常安装在机器鱼的头部,头部的被动摆动容易导致视觉成像模糊、成像质量不稳定进而影响机器鱼的闭环控制。因此,抑制机器鱼头部摆动幅度并优化其稳定性成为后续精准控制的重中之重。王平<sup>[11]</sup>等人通过引入头部摆动方程和摆动中心偏移量,使优化后的运动学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,有效抑制了其头部的摆动。孙飞虎<sup>[12]</sup>等人基于水动力学模型,分析了两种鱼体波模型下机器鱼头部的摆动,随后采用遗传算法对改进的鱼体波模型进行参数优化,验证了算法的有效性,取得机器鱼头部的摆动最小。在多鱼鳍设计方面,郑长镇<sup>[13]</sup>提出了一种刚柔耦合仿生机器鱼的结构设计方案,研制的机器鱼配备了臀鳍、尾鳍和两个胸鳍用于多维运动的切换,其中刚柔耦合结构的尾鳍推进器,使其能够具备身体柔软度和刚度的可控性,同时获得更

优的推进效率和稳定性。刘宁<sup>[14]</sup>研究了胸鳍展弦比对机器鱼推进性能的影响，对比了装配三组展弦比依次递增胸鳍的鱼体推进性能，发现相同前缘的低展弦比胸鳍稳定性优于高展弦比胸鳍，对不同水下任务所需要的机器鱼胸鳍展弦比的选择做出了参考。Zhang<sup>[15]</sup>等人提出并开发了一种结合了昆虫翅膀和鱼鳍的优点的集成仿生机器鱼，通过将两个尾鳍平行设置在机器鱼的尾部作为主要推进机构，两个尾鳍的相对拍打在巡航过程中产生相互相反的侧向力，并在机器鱼的两侧配备了两个模仿昆虫翅膀功能的胸鳍，从而实现稳定和高性能的游泳。文力<sup>[16]</sup>等人在自驱动机器鱼实验平台上安装了基于射流弹性体驱动器的背鳍和臀鳍，研究发现线性加速度在背鳍和臀鳍展开的情况下，与在闭合时相比提升了 32.3%，而侧向力下降了 24.8%。Zhong<sup>[17]</sup>等人学习背鳍和臀鳍截面的锐利程度对直游性能的影响，发现背鳍和臀鳍的截面形状越锐利，直游速度和效率可分别提升 15%和 50%。Mignano<sup>[18]</sup>等人通过研究发现相互作用的鳍产生的力与非相互作用鳍组合产生的力的矢量和非常不同，并且操纵背鳍、臀鳍与尾鳍之间的相位和位置会极大地影响产生的推进力的大小和形状，这为设计机器鱼的各种鳍的相互位置提供了参考。此外，研究者还从姿态控制、预测控制、多传感器融合等方法优化机器鱼头部稳定性。

因此为了探究不同鱼鳍对鱼类游动过程的影响，本文采用模块化的设计思想，研制出多鳍可拆卸的单关节柔性尾鳍机器鱼，体型小巧，基于具有特定刚度的柔性尾鳍，适合大幅度的柔性摆动。并针对有无胸鳍、腹鳍对机器鱼水下游动的头部稳定性影响进行量化实验，为后续探究机器鱼的游动性能优化做铺垫。

## 2、材料与方法

### 2.1 单关节机器鱼结构设计基本设计思想

鲹科鱼类的尾鳍推进模式中，波动主要集中在身体后半部分的尾鳍和尾柄，而身体前半部分的波幅较小，明显的侧向位移主要出现在尾鳍和尾柄部分。尾鳍通过具有一定幅度的摆动，对鱼体产生推进力，使得该模式下的机器鱼适合进行长期巡游。

考虑到小型仿生机器鱼内部的利用空间较为局促，从结构设计和功能实现上进行考量，依照鲹科模式设计出一款能完成直游、转弯等高效率高性能游动的小型机器鱼“Nemo”，从单关节设计上简化了机器鱼鱼尾的摆动方式，使尾巴摆动拟合鱼体波方程，实现逼真的仿生效果。

### 2.2 机器鱼外形结构设计

仿生机器鱼 Nemo 的结构由鱼头外壳、鱼身后盖、尾柄、胸鳍、腹鳍和柔性尾鳍组成。依照鲹科模式，本文所设计的单关节机器鱼仅有一个自由度，设计简洁紧凑。机器鱼鱼身的前 1/2 部分为鱼头外壳和鱼身后盖所组成的密闭空间，其内部存放机器鱼的控制电路和驱动电源等电子器件，后 1/2 为尾柄和尾鳍。小型机器鱼结构设计如图 1 所示，机器鱼性能参数与系统控制配置列于表 1。

仿生机器鱼在鱼头外壳上需保证具有良好的减阻特性，因此机器鱼的外形采用流线型设计，以减少机器鱼在水下所受内摩擦力以及避免涡旋的形成。设计上，鱼头外壳和鱼身后盖抽壳形成中空腔体，便于内部放置电子器件。鱼头外壳开口处设计有一圈凹槽，与鱼身后盖开口处设计一圈与鱼头凹槽配合的凸台，两者进行配合拼接，拼接处所形成的凹槽涂抹硅橡胶做防水处理，同时方便后续拆装。于此同时，在拼接处涂抹一层硅胶，硅胶在固定比例的凝固剂下能快速凝固，减少了水对拼接处的摩擦力。此做法增强了机器鱼的防水性能，有效保护了内部的电子器件。

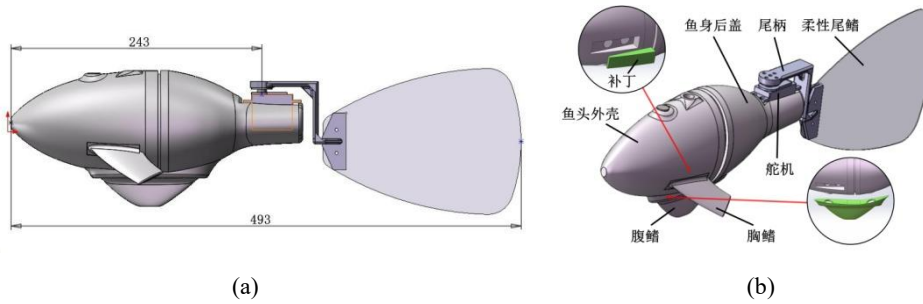


图 1 小型机器鱼 Nemo 装配体模型

表 1 机器鱼 Nemo 的性能参数

项目	参数
外形尺寸（除胸鳍和腹鳍）：cm	493(L)×70(W)×140(H)
外壳材质	未来 8200Pro 树脂
总重量：kg	0.879
最大直线速度：BL/s(cm/s)	0.71(34.58)
舵机型号	DS3235 防水舵机
舵机空载转速	0.13sec/60°
主控芯片	ATmega328P
工作电压	DC 5V

### 2.3 机器鱼鱼鳍可拆卸化设计

为了研究胸鳍和腹鳍是否影响机器鱼游动时的头部稳定性，我们设计了便于拆装的胸鳍和腹鳍。对于可拆卸的胸鳍，在鱼头壳体两侧通过拉伸切除设定了等壁厚的槽位，并在槽位内预埋了两颗圆形磁吸贴片。胸鳍同样预埋了两颗磁吸贴片，以实现磁吸安装；当机器鱼没有安装胸鳍时，可磁吸安装用于填补槽位的补丁，腹鳍的拆装同样采用上述的安装方法，安装方法如图 1 所示。此做法杜绝了水从胸鳍和腹鳍安装处进入机器鱼内部，并保持了鱼头的流线型。所设计的胸鳍体积为  $5.74\text{cm}^3$ ，质量为  $8.04\text{g}$ ，其截面形状为扁平椭圆，击水攻角为  $42^\circ$ 。所设计的腹鳍体积为  $19.22\text{cm}^3$ ，质量为  $26.91\text{g}$ ，其截面形状同样为扁平椭圆。胸鳍和腹鳍外形如图 2 所示。



图 2 胸鳍（左侧）主视图与左视图(a)和腹鳍主视图与左视图(b)

机器鱼的尾鳍同样易于拆装。机器鱼尾巴总体由舵机、尾柄和柔性尾鳍组成，尾柄安装在舵机的舵盘上，尾柄随舵机转动而摆动。舵机安装处与鱼体内部贯通，此处注射灌密封胶进行防水隔离。柔性尾鳍安装于尾柄处，通过螺栓固定与拆装。值得注意的是，真实的鱼类在游动时，尾鳍的摆动并非简单的左右摆动，而是形成一种波浪形的运动模式。如图 3 所示使用厚度为  $1\text{mm}$  的 PVC 材质塑料板裁切制成长度为  $25\text{cm}$  的柔性尾鳍，形成在单关节驱动设计上由尾柄驱动的柔性被动结构，能让机器鱼在游动过程中柔性尾鳍能产生波动，

使机器鱼的尾鳍摆动模仿真实鱼类的摆动，更有效地推动水流，从而提高推进效率。表 2 是机器鱼鱼鳍的参数。

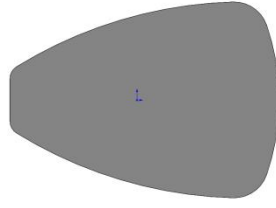


图 3 尾鳍形状

表 2 鱼鳍参数

鱼鳍	材质	面积	长度	长宽比	厚度
尾鳍	聚氯乙烯(PVC)	0.2070 m <sup>2</sup>	17.37 cm	1.348	1mm

鱼鳍	材质	截面形状	体积	质量
胸鳍	未来 8200Pro 树脂	扁平椭圆	5.74cm <sup>3</sup>	8.04g
腹鳍	未来 8200Pro 树脂	扁平椭圆	19.22cm <sup>3</sup>	26.91g

### 3、机器鱼水下实验结果及讨论

#### 3.1 实验平台与实验方法

为了探究小型机器鱼的直线推进性能、转弯性能以及头部稳定性，本研究搭建了一个可以测试自由游动的实验平台(图 4(a))。机器鱼实验平台包括实验水池(5.5m × 1.2m × 2m)、立式镜子(0.6m × 0.8m)、1 台 Phantom v1212 高速摄像机(美国, Vision Research 公司)、AF 定焦镜头(日本, 适马 105mm f2.8)、LED 照明系统(中国, VISCO, 功率 150W, 色温 5500K)等。实验水池由铝型材搭建, 尺寸为 5.5m × 1.2m × 2m, 后续实验保持 40cm 水深。

首先使用支架固定一台高速摄像机, 从侧上方对准机器鱼的运动区域, 拍摄帧率固定在 120fps。将一个立式镜子竖立紧贴放置在鱼缸一侧并保证处于拍摄区域内。拍摄画面 1 如图 4(b)所示, 另将高速摄像机所拍摄的视频进行 180° 旋转后作为画面 2, 取得镜子反射形成的虚像中的机器鱼作为第二台“高速摄像机”所拍摄的机器鱼, 此时将画面 2 拍摄镜子所形成的虚像作为第二台“高速摄像机”的成像画面。此方法利用一台相机与一面镜子构建了双目视觉系统, 与使用两台相机构建双目视觉系统相比, 实现了相同的同步效果。拍摄时缩小光圈获得大景深, 使镜子的机器鱼成像更清晰。标记点分布如图 4(b)所示, 使用马克笔在机器鱼体对称轴线上做标记, 标记点 1 分布在鱼头最前端, 标记点 2 分布在质点正上方。两个标记点在镜子中的像也可以清晰看到, 并把这个像看成第二台相机的画面。通过使用标定板来确定相机的相对位置, 将标定结果和 mp4 格式视频导入基于 MATLAB 的开源软件 DLTdv<sup>[19]</sup>对标记点 1 和标记点 2 进行半自动追踪, 获取标记点的三维位置信息。

实验时机器鱼露出水面 1cm, 忽略机器鱼在竖直方向上的轻微起伏波动, 只考虑其在水平面上的运动。机器鱼游动有足够的空间移动, 不会受到侧边界和自由表面的干扰。同时避免实验过程中其他因素的干扰, 机器鱼每一次运动完成之后, 待水池中水面平静之后再继续进行下一组数据的测量。后续实验将利用此方法分析两个标记点的三维位置信息并得出数据。



图 4 实验平台实拍图 (a) 和追踪机器鱼运动的标记点 (b)

### 3.2 直线推进实验

提高机器鱼的推进速度需考虑尾柄的摆动幅度。尾柄摆动的角度影响尾鳍摆动的角度，间接影响机器鱼推进力的大小。当摆动角度过小，推进力可能不足以产生较高的速度；当摆动角度过大，虽然推进力增大，但是造成的阻力增大，会造成推进效率的下降。因此，需要找到一个合适的摆动角度，使得推进力能够较好地克服水阻力，从而提高机器鱼的推进速度。此前多次实验得出机器鱼尾柄摆角振幅为  $25^\circ$  且舵机全速转动下，摆动频率达到  $1.8\text{Hz}$ ，此时机器鱼达到最大平均直线推进速度  $34.58\text{cm/s}$  ( $0.7\text{BL/s}$ )。且当尾柄摆角振幅大于  $20^\circ$  后，机器鱼推进的头部稳定性稍差。在直线推进过程中，设尾柄居中状态相位为  $0^\circ$ （即尾柄处于鱼身的对称轴线上），则尾柄振幅为  $20^\circ$ ，舵机在左右极限位置延迟  $280\text{ms}$ ，尾柄左右摆动时舵机转速均匀一致。保持尾柄摆角振幅为  $20^\circ$  且保证其他运动参数不变，装配上胸鳍和腹鳍，研究机器鱼鱼尾摆动频率在  $0.5\text{Hz}$ 、 $1.0\text{Hz}$ 、 $1.5\text{Hz}$  变化时，推进速度随尾柄摆动频率的变化规律。

实验观察可知，机器鱼上端的标记点 2 的运动路径更接近直线，因此可通过分析标记点 2 实时变化的三维位置信息获得直线推进速度。如图 5(a)所示为机器鱼游动达到稳定速度的状态。利用 MATLAB 软件对标记点 2 的三维位置信息进行分析，得出在不同尾柄摆动频率下机器鱼所获得的直线推进速度，如图 5(b)所示，速度单位用体长/秒 (Body Length/second, BL/s) 表示。将摆动频率为  $1.8\text{Hz}$  的最大平均直线推进速度加入图示，可以看出在测试的摆动频率范围内，机器鱼推进速度随着摆动频率的增加而非线性的增大。这是由于在振幅不变情况下，频率的提高会引起速度的变化，而速度与流体力呈二次方的关系。同时，与其它设计的机器鱼比较，我们发现，本项目的机器鱼在低频下（频率为  $1\text{Hz}$ ）速度性能弱于麻省理工学院设计的 RoboTuna<sup>[20]</sup> 和 RoboPike<sup>[21]</sup>，但在频率较高时（大于  $1.5\text{Hz}$ ），它的直线游动速度优于麻省理工学院设计的 soft robotic fish<sup>[3]</sup> 和哈尔滨工业大学设计的 HRF-II<sup>[22]</sup>。

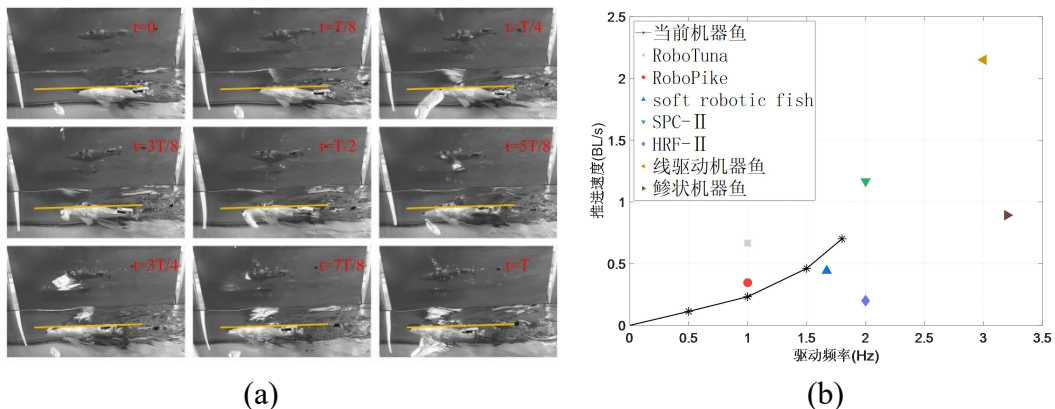


图 5 小型机器鱼在摆动周期内的实验截图(a)和尾部摆动频率对推进速度的影响(b)

### 3.3 转弯实验

最小转弯半径是评估机器鱼运动性能的一项重要指标，机器鱼通过鱼尾的单侧摆动实现转弯运动，且控制节律与直线推进类似。控制步骤如下：首先根据制造的机器鱼结构特性，设定鱼尾的摆动范围，并根据机器鱼的实际转弯需求设计相应的控制程序。设尾柄居中状态相位为 $0^\circ$ （即尾柄处于鱼身的对称轴线上），设置特定的尾柄摆动范围，机器鱼向左转弯时尾柄摆动的中间位置为 $-64^\circ$ ，振幅为 $16^\circ$ （即范围在 $-48^\circ \sim -80^\circ$ ）。对称地，机器鱼向右转弯时尾柄摆动的中间位置为 $64^\circ$ ，振幅为 $16^\circ$ （范围在 $48^\circ \sim 80^\circ$ ）。当尾柄摆出至 $80^\circ(-80^\circ)$ 时，设置舵机延迟 $500\text{ms}$ ，尾柄收回至 $48^\circ(-48^\circ)$ 时，设置舵机延迟 $280\text{ms}$ ，尾柄摆出和收回的舵机转速一致。随后将机器鱼尾鳍设置到居中状态并放置到水面静止不动，进行原地持续转弯的实验并观察记录，为了减小转弯起步误差，路径跟踪从机器鱼起步 $5\text{s}$ 后开始记录。对机器鱼标记点 2 进行追踪，利用 MATLAB 软件处理标记点 2 的三维位置信息并绘出机器鱼左转弯路径。如图 6 所示，图 6(a)是间隔 $1\text{s}$ 时机器鱼向左转弯的实验截图，图 6(b)展示了机器鱼向左转弯的路径。

观察视频和分析转弯路径，可以看出机器鱼转弯一圈耗时 $9\text{s}$ 。尾柄摆出阶段，机器鱼实现转向效果，尾柄摆至关节限位角度后，程序设置了较长的舵机延迟，延后了尾柄回收阶段，机器鱼利用了惯性，增强了转向效果；在尾柄收回阶段，机器鱼在转向的同时被向前推进，尾柄摆至关节限位角度后，程序设置了较短的摆动延迟，缩减了推进距离，削弱了推进效果。而较小的转弯摆动范围提高了摆动的频率，让转弯更迅捷急促，有利于缩小转弯半径。机器鱼的转弯路径呈现椭圆形状，拟合后的椭圆曲线方程如下：

$$\frac{x^2}{0.15^2} + \frac{y^2}{0.14^2} = 1$$

椭圆的长轴为 $0.30\text{m}$ ，短轴为 $0.28\text{m}$ 。实验表明机器鱼的静止转弯半径小，具备优秀的转弯性能。表 3 比较了国内外几种不同机器鱼的转弯性能，用转弯半径比 $\text{Tr}$ （Turning radius，实际转弯半径相对于其机器鱼身体长度比值）评估机器鱼的转弯效率，它的单位为身体长度。我们发现不同机器鱼采用不同的关节数目与不同的转弯策略，所获得的转弯性能也不尽相同。值得注意的是，转弯路径呈现椭圆状且椭圆曲线方程的长轴与短轴接近，因此取半长轴和半短轴的平均值作为我们机器鱼的最小转弯半径进行比较。

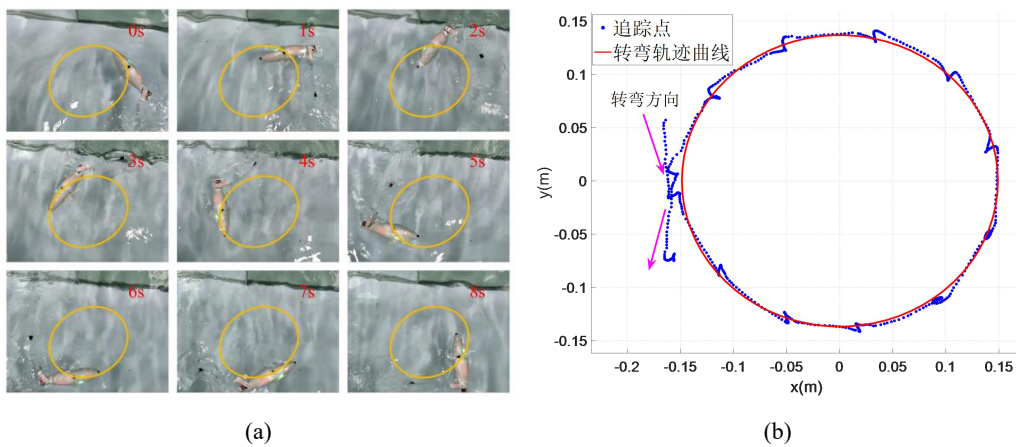


图 6 机器鱼原地左转弯序列图(a)和机器鱼原地转弯的路径(b)

表 3 与其他机器鱼转弯性能的对比

研究机构	机器鱼	驱动转弯的关节数目	转弯半径比 Tr
北京理工大学	BLRF-I系列机器鱼 <sup>[8]</sup>	1/2/3	1.22/0.40/0.34
华中农业大学	水产养殖机器鱼 <sup>[23]</sup>	2	0.45
英国埃塞克斯大学	“fish-G9”仿生机器鱼 <sup>[24]</sup>	3 或 4	0.30
日本运输省船舶技术研究所	PPF-08i 机器鱼	1	0.50
当前机器鱼	小型单关节机器鱼 Nemo	1	0.29

### 3.4 头部稳定性实验

机器鱼头部往往需要安装摄像头以辅助其在水下进行探测和人员搜救，因此需要机器鱼尽量保持较小的头部摆动幅度，确保摄像头能平稳清晰地成像，以提高成像质量和数据的可靠性，同时头部的摆动也对游动效率产生显著影响<sup>[3,25]</sup>。机器鱼头部被动摆动往往与尾巴摆动情况相关，而机器鱼的腹鳍和胸鳍对机器鱼头部的稳定性有重要作用，能协调机器鱼横向平衡，减少机器鱼在水中的侧倾和头部的俯仰。

用机器鱼头部的姿态摆角评估机器鱼的头部稳定程度，姿态摆角越大说明机器鱼头部越不稳定，姿态摆角越小说明机器鱼头部越稳定。机器鱼巡游状态下，设定保持尾柄摆角为 40 度且保证其他运动参数不变，研究机器鱼鱼尾摆动频率在 0.5Hz、1.0Hz、1.5Hz 变化时，机器鱼头部姿态摆角随机器鱼装配胸鳍和腹鳍、不装配胸鳍和腹鳍、仅装配胸鳍、仅装配腹鳍四个不同状态下的变化情况。后续得出标记点 1 和标记点 2 的三维位置信息，过标记点 1 和标记点 2 作直线，计算此直线在三个摆动周期内所形成的头部姿态夹角并取平均值。

由图 7 看出，在单一摆动频率下，机器鱼某种状态的姿态摆角越大对应其推进速度越大；对比不同摆动频率，从 0.5Hz 提升到 1.0Hz 后，姿态摆角的范围基本没有变化，而从 1.0Hz 提升至 1.5Hz 后，姿态摆角大幅度减小，机器鱼的头部摆动有明显减弱。总体来看，在尾鳍低频拍动时，机器鱼头部摆角较大，而在高频拍动时较小。这是因为在高频拍动情况下，单关节控制的弹性尾鳍变形较大，从而引起尾鳍波数提高。而在低频时，有装配胸鳍和腹鳍情况下较小，而在尾鳍高频拍动时，机器鱼头部摆角在无胸鳍和腹鳍情况下较小。因为头部的摆动可以看成是尾鳍驱动和头部流体力相互作用下的受迫振动，与头部的固有频率相关。一方面头部有无装配胸鳍和腹鳍，影响质量从而影响了固有频率；另一方面，流体力的大小以及与尾鳍之间受力的相位影响力受迫振动的作用力大小。具体的作用我们还没有厘清，这也是我们下一步的工作规划方向之一。此外，在低频拍动时，装配胸鳍、腹鳍与否对头部摆角的影响相对较小，变化范围大约为 2°；而在高频拍动时，头部摆角的变化范围为 5.6°。表 4 列举了不同机器鱼的头部摆动情况，本文用摆动角度和无量纲振幅（摆动幅度相对于其身体长度比值）来评估摆动的程度。相较于其他的机器鱼，机器鱼 Nemo 的摆幅介于河海大学的三关节仿生机器鱼<sup>[11]</sup>和英国埃塞克斯大学的 iSplash-I 机器鱼<sup>[10]</sup>之间。值得注意的是，理论上多关节的机器鱼产生更显著的波动，多节之间的运动会抵消左右方向的力，头部摆角相对较低；相比之下，作为机器鱼 Nemo 的头部摆角并不大。



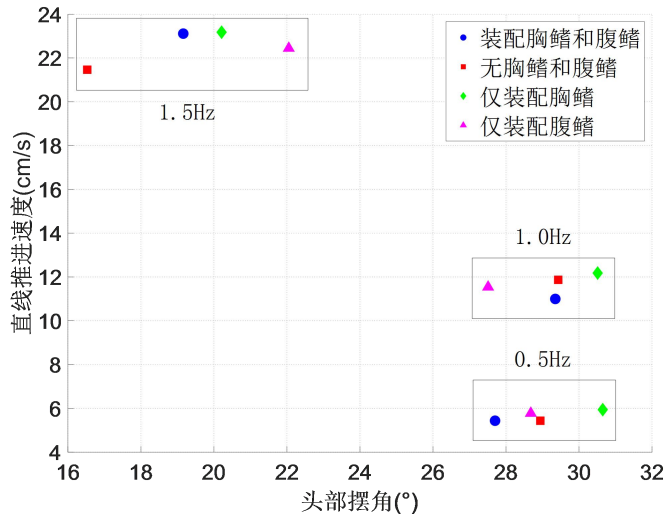


图 7 不同频率下 4 种装配鱼鳍情况的姿态摆角与推进速度关系分布图

表 4 与其他机器鱼头部摆动情况的对比

研究机构	机器鱼	头部摆动角度: °	无量纲振幅
河海大学	三关节仿生机器鱼 <sup>[11]</sup>	7(1.0Hz)/10(1.5Hz)	-
英国埃塞克斯大学	iSplash-I 机器鱼 <sup>[10]</sup>	-	0.176(Mode 1)/0.072(Mode 2)
当前机器鱼	小型单关节机器鱼 Nemo	27.51(1.0Hz)/16.53(1.5Hz)	0.125(1.0Hz)/0.067(1.5Hz)

#### 4、结论

本文从鱼鳍模块化设计思路出发，研制了一款整体结构紧凑、性能良好的小型单关节仿生机器鱼，并设计一套多种尾鳍作用的系统，机器鱼腹鳍、胸鳍与尾鳍的模块化拆装降低了机器鱼防水工作的难度。单关节单舵机驱动尾柄与柔性被动结构的尾鳍波动，实现了较为逼真的仿生效果。搭建水下实验平台，使用高速摄像机搭建双目视觉系统记录机器鱼游动，记录下机器鱼头部最前端以及质点正上方的两处标记点的三维位置信息变化。根据标记点的三维位置信息变化分析机器鱼不同频率的直线推进速度变化，优化机器鱼静止转弯的尾鳍摆动控制节律，以及探讨多种鱼鳍组合装配对机器鱼在游动时头部稳定性的影响。

实验结果证明：机器鱼具有良好的直线推进性能和静止转弯性能；在 0.5Hz、1.0Hz、1.5Hz 的摆动频率下，装配上胸鳍和腹鳍状态下的机器鱼的头部稳定性在尾鳍低频摆动时更优，而在高频游动时没有显示出优势，这也和自然界中鱼类在高频游动时除尾鳍外的各种鳍紧贴身体的现象相一致。此外，本研究机器鱼设计到性能测试都体现了节约成本的思想，为低预算条件下的鱼类游动机理和机器鱼设计分析提供了新思路。

下一步，我们将构建刚体头部与柔性尾鳍耦合下的动力学方程，研究单关节机器鱼流体-结构共振与头部-尾鳍避开共振双重限定下的游动特性。同时，将在机器鱼中加入反馈，探究单关节机器鱼头部-尾鳍协调作用下对游动性能的优化。

#### 参考文献

- [1] 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 QP, Wang S, Tan M, et al. Research development and analysis of biomimetic robotic fish [J]. Journal of System Science and Mathematical Science Chinese Series, 2012, 32(10): 1274-1286.
- [2] Katzschmann RK, DelPreto J, MacCurdy R, et al. Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish [J]. Science Robotics, 2018, 3(16): eaar3449.
- [3] Marchese AD, Onal CD, Rus D. Autonomous soft robotic fish capable of escape maneuvers using fluidic elastomer actuators [J]. Soft robotics, 2014, 1(1): 75-87.
- [4] Aritani T, Kawasaki N, Takada Y. Small robotic fish with two magnetic actuators for autonomous tracking of a goldfish [J]. Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms, 2019, 8(1): 69-74.
- [5] Song JL, Zhong Y, Du RX, et al. Tail shapes lead to different propulsive mechanisms in the body/caudal fin undulation of fish [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2021, 235(2): 351-364.
- [6] Zhong Y, Song JL, Yu HY, et al. Toward a transform method from lighthill fish swimming model to biomimetic robot fish [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(3): 2632-2639.
- [7] 吴文广. 仿鲹科机器鱼推进性能实验研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.  
Wu WG. Experimental Research on the Propulsion Performance of Carangiform Robotic Fish [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010.
- [8] 王飞, 王庆林, 王震宇等. 仿生机器鱼巡游性能分析与实验 [J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(01): 80-84.
- Wang F, Wang QL, Wang ZY, et al. Cruising performance analysis and experiments of biomimetic robotic fish [J]. Chinese Journal of Engineering, 2012, 34(1): 80-84.
- [9] 杜如虚, 钟勇, 陈贤帅等. 基于拉线机构的机器鱼运动控制仿真研究 [J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2014, 28(05): 409-414.
- Du RX, Zhong Y, Chen XS, et al. The kinematics simulation analysis of robot fish based on wire-driven mechanism [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2014, 28(05): 409-414.
- [10] Clapham RJ, Hu H. ISplash-I: High performance swimming motion of a carangiform robotic fish with full-body coordination [C] // IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2014: 322-327.
- [11] 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(02): 196-201.
- Wang P, Xu BZ, Lou BD, et al. Ptimization and experimentation on the kinematic model of bionic robotic fish [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2017, 12(2): 196-201.
- [12] 孙飞虎, 喻俊志, 徐德. 具有嵌入式视觉的仿生机器鱼头部的平稳性控制 [J]. 机器人, 2015, 37(2): 188-195.
- Sun, FH, Yu JZ, and Xu D. Stability control for the head of a biomimetic robotic fish with embedded vision [J]. Robot, 2015, 37(2): 188-195.
- [13] 郑长镇. 仿生机器鱼的刚柔耦合设计及其巡游性能优化 [D]. 广西: 广西大学, 2023.  
Zheng CZ. Rigid-flexible coupling design of biomimetic robotic fish and its cruising performance optimization [D]. Nanning: GuangXi University, 2023.
- [14] 刘宁. 仿生机器鱼胸鳍结构优化及推进性能分析 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.  
Zhang N. Optimization of pectoral fin structure and propulsion performance analysis for bionic robotic fish [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [15] Zhang SW, Qian Y, Liao P, et al. Design and control of an agile robotic fish with integrative biomimetic mechanisms [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(4): 1846-1857.

- [16] Chen BX, Jiang HZ. Swimming performance of a tensegrity robotic fish [J]. *Soft robotics*, 2019, 6(4): 520-531.
- [17] Zhong Q, Dong HB, Quinn DB. How dorsal fin sharpness affects swimming speed and economy [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 878: 370-385.
- [18] Mignano AP, Kadapa S, Tangorra JL, et al. Passing the wake: using multiple fins to shape forces for swimming [J]. *Biomimetics*, 2019, 4(1): 23-23.
- [19] Hedrick TL. Software techniques for two- and three-dimensional kinematic measurements of biological and biomimetic systems [J]. *Bioinspiration Biomimetics*, 2008, 3(3): 034001.
- [20] Barrett DS, Triantafyllou MS, Yue DKP, et al. Drag reduction in fish-like locomotion [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1999, 392(0): 183-212.
- [21] Anderson JM, Chhabra NK. Maneuvering and stability performance of a robotic tuna [J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2002, 42(1): 118-126.
- [22] 刘英想, 刘军考, 陈维山等. 新型两关节机器鱼的研制及实验研究 [J]. *船舶工程*, 2008, 176(04): 28-31.
- Liu YX, Liu JK, Chen WS, et al. Development and experiment of new two-joint robot fish [J]. *Ship Engineering*, 2008, 176(04): 28-31.
- [23] 曾鑫. 水产养殖机器鱼控制系统搭建与试验 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- Zeng X. Construction and Experiment of Aquaculture Robotic Fish Control System [D]. Wuhan; Huazhong Agricultural University, 2022.
- [24] Liu JD, Hu HS. Biological inspiration: from carangiform fish to multi-Joint robotic fish [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2010, 7(1): 35-48.
- [25] Zhong Y, Wu J, Wang, C, et al. Hydrodynamic effects of the caudal fin shape of fish in carangiform undulatory swimming [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 236(12): 6385-6394.