

doi: 10.7690/bgzdh.2024.10.014

基于 BCF 模式的三关节仿生金龙鱼的设计与验证

唐斌¹, 张宇², 唐可欣², 赵化民²

(1. 中电科海洋信息技术研究院有限公司, 海南 陵水 572400;

2. 博雅工道(北京)机器人科技有限公司, 北京 101100)

摘要: 为提高仿生系统在水中的机动与续航能力, 以金龙鱼为仿生对象并基于身体/尾鳍(body and/or caudal fin, BCF)摆动游动机理设计一种三关节仿生金龙鱼系统。围绕仿生金龙鱼的模块化系统设计、多模态运动、定深定航运动以及水中续航等问题开展研究。通过设计 PID 控制器, 实现仿生金龙鱼的高精度控制以及稳定的定深与定航运动。在实际水环境中对设计的仿生金龙鱼系统进行可行性验证。测试结果表明, 该仿生金龙鱼系统具备较好的机动性与稳定性。

关键词: 仿生金龙鱼; BCF; PID; 无线充电

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A

Design and Verification of a Three-joint Bionic Golden Arowana Based on BCF Model

Tang Bin¹, Zhang Yu², Tang Kexin², Zhao Huamin²

(1. CETC Ocean Information Co., Ltd., Lingshui 572400, China;

2. Boya Gongdao (Beijing) Robot Technology Co., Ltd., Beijing 101100, China)

Abstract: In order to improve the maneuverability and endurance of bionic system in the water, a three-joint bionic goldfish system was designed based on the body and/or caudal fin (BCF) swimming mechanism. The research focuses on the modular system design, multi-modal motion, fixed-depth and fixed-course motion, and underwater endurance of bionic goldfish. Through the design of PID controller, the bionic goldfish can achieve high precision control and stable fixed depth and navigation movement. The feasibility of the bionic goldfish system designed in this paper is verified in the actual water environment. The test results show that the bionic goldfish system has good maneuverability and stability.

Keywords: bionic goldfish; BCF; PID; wireless charging

0 引言

海洋逐渐成为人们关注焦点^[1]。水下机器人也成为代替人类不断突破极限探索水下世界的有力工具。随着水下机器人研究的深入, 仿生水下机器人迅猛发展^[2]。由于鱼类在水中低能耗、高效率、高机动的非凡运动能力, 因此鱼类特殊的生理构造和推进机理成为当前的研究热点。

鱼类的推进模式可分为身体/尾鳍(BCF)推进和中间鳍/对鳍(median and/or paired fin, MPF)推进^[3-4]。其中, BCF 推进模式的鱼类, 推进效率高、速度快、机动性强, 被众多学者作为仿生研究对象。同时 BCF 模式还可分成鳗鲡、鲹科、箱鲀科及鲹科模式^[5]。如金龙鱼就是鲹科推进模式, 具有较高游动效率。

笔者以金龙鱼为仿生对象, 开展基于 BCF 推进模式的三关节仿生金龙鱼系统设计。通过设计改进的串级 PID 控制^[6-7], 实现仿生金龙鱼高效控制与

定深、定航等运动功能。设计吸排水模块, 实现上浮、下潜运动功能。笔者设计的无线充电模块, 能够有效降低充电复杂度。最后对研制的仿生金龙鱼进行水池测试, 验证系统具有高可靠性与较好生物机动性。

1 机械结构设计

1.1 鱼体结构设计

由于鲹科鱼类在游动时主要通过脊椎曲线的波动来产生推进力^[8-10], 这种方式的特点是身体躯干部分的肌肉基本上不动, 其波动范围基本上集中在整个鱼后面 1/3 的部分。

由此, 在仿生机器鱼的设计中将鱼体头部与躯干简化为刚体, 尾部设计成 3 个可摆动的关节为机器鱼提供动力, 每个关节的转动由舵机负责, 由 3 个舵机串联作为驱动模块, 置于机器鱼鱼身的后 1/3 处。仿生金龙鱼机械结构设计如图 1 所示。

收稿日期: 2024-06-27; 修回日期: 2024-07-25

第一作者: 唐斌(1978—), 男, 陕西人, 硕士。

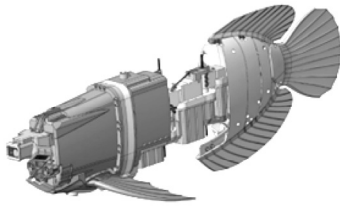


图 1 鱼体结构设计

1.2 吸排水模块设计

上浮下潜是鱼类的基础运动之一，鱼的沉浮运动依靠调节鱼体内鱼鳔中的气体体积实现。参考鱼类沉浮运动原理，仿生金龙鱼采用吸排水方式实现机器鱼的沉浮控制。

仿生金龙鱼内设计有一个吸排水舱，由步进电机与齿轮传动机构带动滚珠丝杠做往复运动，进而通过丝杠末端连接的活塞机构实现吸水与排水作业，最终改变仿生金龙鱼的重浮心相对位置。当重力大于浮力时下沉，当重力小于浮力时上浮。吸排水设计原理如图 2 所示。

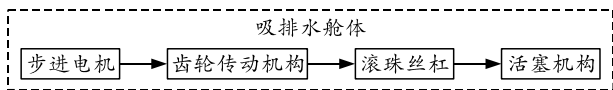


图 2 吸排水结构原理

2 控制系统设计

2.1 主控制方案设计

仿生金龙鱼主控制部分采用模块化设计，以主控板卡为核心，接口丰富便于功能扩展。主控芯片选用 STM32 CortexM4 系列的高性能处理器，集成 4 路 PWM 信号，用于 3 个尾关节与步进电机的控制。为减轻主控板负担，设计传感器电路板卡处理各类传感器信息，并通过 USART 协议实时上传给主控板。此外，主控板卡还设计有数据存储接口和无线通信接口，数据存储卡负责实时存储金龙鱼在航行过程中的运动数据，无线通信模块用于在任务结束后的数据上传，便于数据的分析与整理。主控制系统架构如图 3 所示。

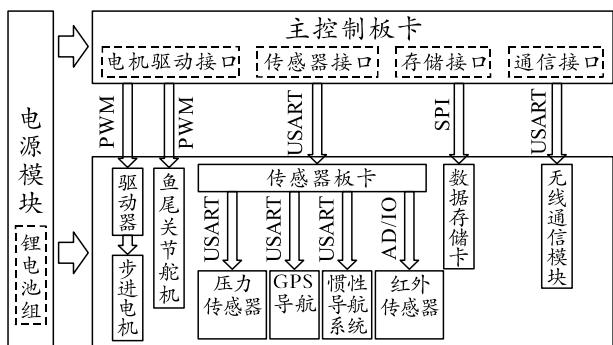


图 3 主控制系统设计结构

2.2 PID 控制器设计

仿生金龙鱼在水下长时间航行时，需要保证自身在水下稳定的进行定深与定航运动。定深运动通过前文设计的吸排水机构实现，通过计算内置深度传感器反馈的当前深度与期望深度的差值，将此偏差量输入 PID 控制器，利用内部电机控制舱体内吸排水，调节金龙鱼重力，最终实现仿生金龙鱼在水中的固定深度航行。定深控制框如图 4 所示。

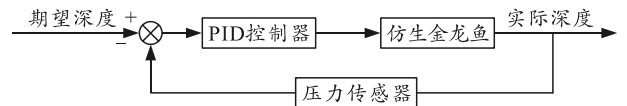


图 4 仿生金龙鱼定深运动控制框

仿生金龙鱼通过搭载的惯性导航系统实时获取当前的实际航向角度，通过设定的初始航向角与反馈回的实际航向角的偏差值作为 PID 控制器的输入，驱动 3 个鱼尾关节周期性摆动，实现仿生金龙鱼在水中的定航运动。定航控制框如图 5 所示。

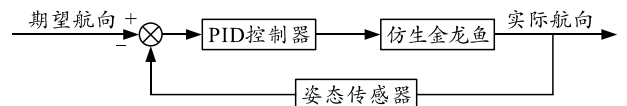


图 5 仿生金龙鱼定航运动控制框

3 无线充电模块设计

仿生金龙鱼内部设计无线充电模块，主要由接收线圈与整流电路组成，基于磁共振无线电能传输原理，完成能量交换，从而实现无线充电。磁共振无线电能传输原理如图 6 所示。

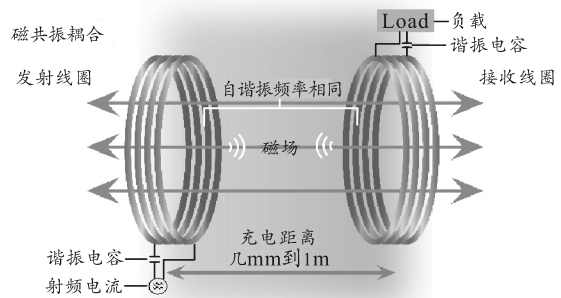


图 6 磁共振无线电能传输原理

图中接收线圈选用扁平螺旋线圈，该类型线圈体积小且密封较为容易，能够较好的适应本次仿生金龙鱼有限的安装空间。

由于接收线圈感应到的是高频电磁场，对外输出的是高频电流，需要对其进行整流滤波后才可供仿生金龙鱼使用，因此设计高频同步整流电路，有效提高系统充电效率。无线充电模块设计如图 7 所示。

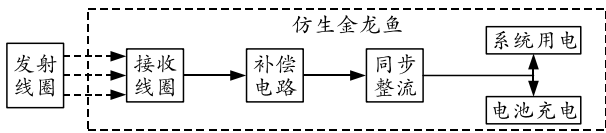


图 7 无线充电模块结构设计

4 实验测试及结果

根据以上仿生金龙鱼的设计，研制了一条仿生金龙鱼，经过组装调试后，对仿生金龙鱼进行运动测试。

1) 直线游动与转向。通过设置控制程序，使仿生金龙鱼在水中自主运动，利用尾鳍驱动进行直线游动与转向。实验结果如图 8 所示。

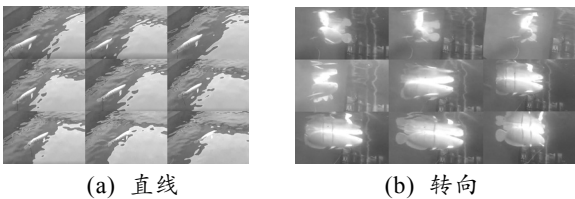


图 8 直线游动与转弯游动

2) 上浮下潜运动。仿生金龙鱼根据设定指令，在游动过程中通过控制吸排水模块，调节鱼体重力与浮力，从而实现上浮、下潜运动。上浮、下潜实验结果如图 9 所示。

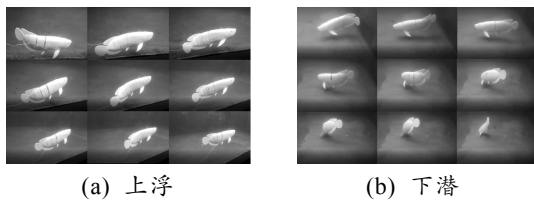


图 9 上浮运动与下潜运动

3) 定深定航运动。通过岸基控制端设置 PID 参数，实现仿生金龙鱼的定深与定航运动。定深、定航实验结果如图 10 所示。

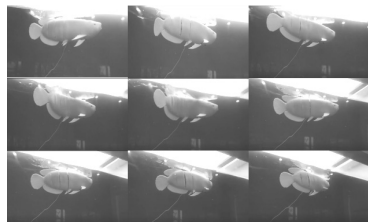


图 10 定深定航

5 结束语

根据鱼类游动机理，笔者基于鲹科鱼类运动特点研制一种基于 BCF 模式的三关节仿生金龙鱼系统，主要研究内容包括鱼体机械结构设计、控制系统设计以及原理样机的实验验证。原理样机测试验证了仿生金龙鱼在水下能够实现自主运动，包

括直线游动、转向运动、上浮下潜以及定深定航在内的运动功能，该仿生系统具备较好的机动性与稳定的可靠性。

笔者在仿生金龙鱼中加入无线充电模块，突破常规有线充电方式，创新性采用无线充电。无需频繁打开充电接口充电，保证仿生金龙鱼整体防水性能。采用接触式充电，提高操作便易性的同时，对于仿生金龙鱼这类水中设施，无线充电能够有效减少人对带电装置的接触，避免漏电事故发生，提高操作安全性。

笔者设计的仿生金龙鱼具有接近真鱼的仿真外形与运动方式，具备水下自主灵活运动能力，能够很好融入野外环境。通过拓展传感器装置，可应用于水质监测、生态保护、水文测量、水下观测等多种水下作业场景，有效解决人工进行涉水作业时存在的安全性差、效率低、作业范围局限、特殊空间可达性差等问题。

参考文献：

- [1] ZHANG Y, ZENG J, LI Y, et al. Research on reconstructive fault-tolerant control of an X-rudder AUV[J]. IEEE, 2016, 19(9): 1-5.
- [2] 张磊, 孟中杰. 基于尾鳍推进模型的三关节仿生机器海豚系统[J]. 兵工自动化, 2016, 35(12): 72-77.
- [3] ZHENG X, XIONG M, TIAN R, et al. Three-Dimensional Dynamic Modeling and Motion Analysis of a Fin-Actuated Robot[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(4): 1990-1997.
- [4] CAO Y, CAO Y, MA S, et al. Realization and Online Optimization for Gliding and Flapping Propulsion of a Manta Ray Robot[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(11): 2173.
- [5] CHEN X, LI D, MO D, et al. Three-Dimensional Printed Biomimetic Robotic Fish for Dynamic Monitoring of Water Quality in Aquaculture[J]. Micromachines, 2023, 14(8): 1578.
- [6] WANG M, ZHANG Y, DONG H F, et al. Trajectory tracking control of a bionic robotic fish based on iterative learning[J]. Sci. China Inf. Sci, 2020, 63(7): 79-87.
- [7] NEVELN I D, BALE R, BHALLA A P S, et al. Undulating fins produce off-axis thrust and flow structures[J]. Journal of Experimental Biology, 2013, 217(2): 201-213.
- [8] 杨民生, 王耀南, 欧阳红林. 无接触电能传输系统的补偿及性能分析[J]. 电力自动化设备, 2008(9): 15-19.
- [9] 王安忆, 刘贵杰, 王新宝, 等. 身体/尾鳍推进模式仿生机器鱼研究的进展与分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(17): 137-146.
- [10] 朱嘉翔, 竺长安, 王明艳, 等. 仿鲹科类机器鱼的研制与实验[J]. 机械研究与应用, 2005, 18(2): 24-25.