

doi: 10.7690/bgzdh.2016.05.021

基于胸鳍辅助推进的仿生机器鱼

王梅娟, 王楠, 瞿逸洲, 韦典成

(解放军理工大学指挥信息系统学院, 南京 210007)

摘要: 为提高仿生机器鱼游动的机动性能并完善传统尾鳍推进模式, 设计一种基于胸鳍辅助推进的仿生机器鱼。将胸鳍与尾鳍推进模式相结合, 采用正弦信号对仿生机器鱼的尾鳍进行控制, 通过胸鳍来调整鱼体方向, 从而实现上升及下降的动力提供。对机器鱼整体、主控系统、执行模块和通信模块进行设计, 并通过实验验证。实验结果表明: 该仿生机器鱼能够更灵活、更精确地实现浅水中前进、上升下潜以及盘旋、回转和制动, 并通过人机交互对仿生鱼进行控制, 结合其自主避障、图像传输等辅助功能, 实现对海洋环境的实时监测。

关键词: 水中机器人; 仿生机器鱼; 尾鳍推进; 胸鳍辅助推进

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A

Biomimetic Robotic Fish Based on Pectoral Fins Auxiliary Propulsion

Wang Meijuan, Wang Nan, Qu Yizhou, Wei Diancheng

(Command Information System Institute, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: For improving biomimetic robotic fish swimming flexibility and traditional tail fin propulsion, design biomimetic robotic fish based on pectoral fins auxiliary propulsion. Combine pectoral fins auxiliary propulsion mode with tail fin propulsion, use sine signal to control tail of biomimetic robotic fish, change fish swimming direction by pectoral fins, then realize power supply of ascending and descending. Design biomimetic robotic fish, main control system, execution module and communication module, verify it by test. The test results show: the biomimetic robotic fish can be more flexible and precise to realize advancing in shallow water, floating, diving circle flight, rotating and braking, then control fish by human-computer interaction, realize real time monitoring on ocean environment by combining auxiliary functions such as autonomous obstacle negotiation function, and image transmission.

Keywords: underwater robot; biomimetic robotic fish; tail fin propulsion; pectoral fins auxiliary propulsion

0 引言

随着仿生学和机器人学的不断发展, 根据各种隐蔽性、机械性等需求, 出现了类鱼型水中机器人, 也称为仿生机器鱼。仿生机器鱼的研究发展趋势是: 利用新材料、新技术, 对机器鱼的结构不断改进; 结合水动力学研究的进展, 提升机器鱼的综合性能, 使之更加符合鱼类的推进机理。在此基础上, 逐步研发具有 3-D 运动(上浮/下潜)的机器鱼, 并且结合传感和控制技术研制人机交互式的智能鱼。

我国在仿生机器鱼方面开展了大量的研究, 处于世界前列。目前研制了仿鲹科机器鱼、仿生鲤鱼、机器海豚、长鳍波动推进的水下载器、子母式机器鱼等多种原型系统, 形成一系列具有自主知识产权的技术和方法, 实现了仿生机器鱼水下三维高机动游动、机器海豚跃水等独具特色的仿生运动。

基于此, 笔者以仿生机器鱼为研究对象, 完善传统尾鳍推进模式, 设计出基于胸鳍辅助推进的仿生机器鱼。

1 概述

目前, 国际水中机器人^[1]大赛已成功举办多届, 不断推动仿生机器鱼创新创意技术的发展。近年来, 大赛官方平台面向应用市场研发的单关节机器鱼采用鱼体/尾鳍^[2]推进方式前进; 然而, 在自然界中, 许多鱼类是利用胸鳍实现良好的动力定位和机动, 如果将胸鳍作为仿生机器鱼中一个部分, 就可以通过其摆动波动提高仿生机器鱼游动的机动性能或做辅助推进^[3], 使机器鱼具有良好的盘旋、回转和制动能力, 而且可以赋予机器鱼上下浮动的能力, 对机器鱼运动性能的提高具有重要的意义。以此为契机, 笔者开展了对胸鳍的设计与加工研究。

2 技术分析与设计

2.1 可行性分析

以完成近海环境监控、海底探测等任务为假设工作背景, 笔者主要针对胸鳍旋转^[4]对鱼体姿态产生的影响进行分析、实验。希望通过控制胸鳍旋转,

收稿日期: 2016-02-03; 修回日期: 2016-03-25

作者简介: 王梅娟(1984—), 女, 安徽人, 硕士, 讲师, 从事 XML 数据库安全存储、网络信息安全、安全测试研究。

对比胸鳍不同参数下不同旋转角度对鱼体姿态的影响, 选择合适材料制造出具有 3-D 运动的仿生机器鱼, 使其具有盘旋、回转和制动能力, 通过人机交互对仿生鱼进行控制, 并结合其自主避障、图像传输等辅助功能, 实现对海洋环境的实时监测, 以提高任务完成的质量和效率。在此基础上, 笔者设计的水中仿生机器鱼^[5]结合应具有如下 3 大特性:

1) 高效性, 机器鱼体积小、质量轻、能量消耗有限;

2) 机动性, 可以实现自主避障及远程控制等功能;

3) 隐蔽性, 模拟真正的鱼在水中游动机理, 利用并控制涡流, 有利于隐身和突防。

经过构造模型的研究学习, 可以将鱼类胸鳍的复杂运动分解为 4 种基本运动: 前后摆动、拍翼、摇翼、展向伸缩。胸鳍摇动时使鱼体周围流场发生变化, 产生使鱼体上浮或下潜的力; 而胸鳍的不对称运动及耦合运动之间的相位差可以使机器鱼获得良好的机动性能, 使机器鱼具备盘旋、回转和制动的能力。笔者以摇翼的方式结合传统尾鳍推进模式进行研究^[6], 实现上述功能需求。

2.2 胸鳍辅助尾鳍模式设计

鱼类游动方式根据推进模式被分为 2 大类:

1) BCF (body and/or caudal fin) 运动模式, 即通过扭动身体并同时摆动尾鳍产生推动力的方式来向前运动;

2) MPF (middle and/or pectoral fin) 运动模式, 即通过中间鳍和对鳍的运动来产生推力和控制身体平衡。

目前针对 BCF 运动模式的仿生机器鱼推进技术研究较多, 发展也较为成熟, 而 MPF 研究较少。笔者采用传统的 BCF 运动模式作为主要模式, 即采用尾鳍与鱼身摆动产生推动力, 同时采用 MPF 模式辅助推进, 主要采用其中对鳍中的胸鳍, 并对其旋转形态进行控制, 以此实现仿生机器鱼的盘旋、回转和制动以及使其具备 3-D 运动功能。

2.2.1 尾鳍推进模式分析

仿生机器鱼通过尾鳍的摆动来实现自身的推进及机动运动, 基于正弦信号能够对控制参数进行灵活方便的调整并能产生较为平滑的振动的特点, 笔者采用正弦信号对仿生机器鱼的尾鳍进行控制, 仿

生机器鱼的关节按照正弦函数进行简谐振动, 如下式所示:

$$\theta(t) = \theta + A \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (1)$$

其中: $\theta(t)$ 为 t 时刻该关节的目标角度; θ 为关节偏移量; A 表示关节的摆动的幅值; f 表示摆动频率; φ 为关节与关节之间的相位差。胸鳍和尾鳍所产生的推动力主要取决于摆动的幅值和摆动频率, 可以通过调节这 2 个参数控制自主机器鱼的游速。仿生机器鱼的方向则主要由参数 θ 决定, 因为关节偏移量 θ 决定了执行机构推进力的方向。相位差 φ 则用来耦合仿生机器鱼不同关节间的运动, 通过相位差可以设计不同的游动模态, 例如, 左右胸鳍相位差相差 180° 后会出现转弯。

2.2.2 胸鳍辅助尾鳍推进模式设计

结合已有结构设计, 笔者最终完成的仿生机器鱼主要由鱼体、胸鳍和尾鳍 3 部分构成, 并突出强调胸鳍功能设计。鱼体内部密封有各关节的舵机、控制电路、无线通信模块、和电池等器件; 胸鳍由 2 个舵机构成; 尾鳍采用 3 个舵机联合控制来模拟鱼体在水中的摆动; 舵机通过密封较好的轴承与外部胸鳍和尾鳍相连, 壳体分上下 2 部分, 采用 O 型圈实现静密封。

由于鳍的位置旋转发生变化时引起鳍周围流场的变化, 产生了对鳍的阻力, 同时产生了对鱼体的推力, 并使得鱼体受到向上或向下的力实现上浮、下潜功能。在胸鳍运动过程中, 虽然垂直方向上力的分量使鱼发生偏转的力偶, 但是可以通过胸鳍的对称运动而抵消。同时通过胸鳍的不对称运动以及耦合运动之间的相位差可以使其获得良好的机动性能, 借此实现盘旋、回转以及良好的制动效果。仿生机器鱼通过胸鳍来实现鱼体方向的调整, 从而实现上升及下降的动力提供, 使用调整 PWM 波的占空比来改变胸鳍的方向。为了使得机械装置能够很好地实现其运动规律, 将仿胸鳍推进系统运动学模型进行了改进和简化, 笔者最终确定仿胸鳍推进系统实验装置运动规律的数学表达式如下式所示:

$$\theta = \theta_A \sin(\omega \cdot t + \Delta\psi) + \theta_{\text{bias}} \quad (2)$$

式中: θ_A 为当前胸鳍动角; $\Delta\psi$ 为胸鳍之间的相位差; θ_{bias} 为胸鳍运动偏角。

定义胸鳍运动过程中的推力系数 C_x , 侧向力系数 C_z 和力矩系数 C_m 分别为:

$$\left. \begin{aligned} C_x &= \frac{F_x}{1/2\rho v^2 S} \\ C_z &= \frac{F_z}{1/2\rho v^2 S} \\ C_m &= \frac{M}{1/2\rho v^2 SC} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中： F_x 、 F_z 、 M 分别为测试到的推力、侧向力、力矩； S 为机械胸鳍的面积； C 为胸鳍的特征弦长； v 为来流速度。

2.3 模块设计

2.3.1 机器鱼整体设计

机器鱼总体结构大致分成鱼头、鱼体、鱼尾和鱼皮 4 个部分。鱼头设计成内空的流线型，鱼头与第 1 关节交接处安放有电源支架，电源支架主要是来安置控制系统和电池，两侧安装 2 个电机以及胸鳍，顶部安置通信模块；鱼体骨架由 3 个关节前后依次联接而成，3 个关节内开口朝上安装，分别用来安置电机；月牙形尾鳍通过鱼尾联接件与骨架的第 3 关节外相连；防水鱼皮与尾鳍均为软橡胶制成。

2.3.2 主控系统设计

目前市面上提供的嵌入式微处理器主要有单片机、DSP、FPGA 和 ARM，它们各有各的特点，但是仿生机器鱼系统要求多线程并发处理各种传感器信息和信号采集等工作、对处理速度有一定要求。ARM 可以与 Linux 操作系统或者 WinCE 结合应用于各种嵌入式场合；因此，笔者选择 ARM 与开源的嵌入式 Linux 结合，以满足系统要求^[7]。

文中完成的仿生机器鱼主控核心控制器采用 ARM 系列中具有低成本、高性能和低功耗的 STM32F103C8 增强型开发板，该芯片采用 ARM Cortex-M3 内核，但是较小存储容量难以满足需要；因此需要扩展外部存储器，数据存储器采用 SDRAM，程序存储器采用易擦写的 FLASH。

2.3.3 执行模块设计

仿生机器鱼的执行模块主要包括尾鳍和胸鳍部分，采用舵机控制这些部位的运动。通过验证如表 1 所示。

表 1 PWM 波输入时间与舵机输出角度关系

顺时针旋转 30°			逆时针回转 30°		
PWM 波 输入时间 t/ms	占空比/%	舵机 输出角度/(°)	PWM 波 输入时间 t/ms	占空比/%	舵机 输出角度/(°)
1.53	9.27	0.3	1.54	9.33	-2.1
1.51	9.15	1.5	1.56	9.45	-5.7
1.49	9.03	2.9	1.58	9.58	-7.6
1.47	8.91	4.5	1.59	9.64	-9.4
1.46	8.85	6.3	1.61	9.76	-10.8
1.44	8.73	7.0	1.62	9.82	-12.5
1.43	8.67	8.4	1.64	9.94	-14.0
1.41	8.56	9.1	1.66	10.06	-15.8
1.40	8.48	11.1	1.67	10.12	-16.6
1.38	8.36	12.5	1.69	10.24	-17.9
1.37	8.30	14.2	1.70	10.30	-19.4
1.35	8.18	15.7	1.72	10.42	-21.2
1.33	8.06	17.3	1.74	10.55	-22.5
1.32	8.00	19.1	1.75	10.61	-23.7
1.30	7.88	20.7	1.77	10.73	-25.6
1.28	7.76	22.5	1.78	10.79	-27.0
1.27	7.70	24.0	1.80	10.91	-28.4
1.25	7.58	25.9	1.82	11.03	-29.8
1.24	7.52	27.1	1.83	11.09	-31.9
1.22	7.39	28.9	1.85	11.21	-33.5
1.20	7.27	30.1			
1.19	7.21	31.9			
1.17	7.09	33.9			

结论显示，当占空比在 2.5%~12.5%之间时，舵机偏角的线性度较好，对应罗盘位置 0~180°，即比较直流偏置电压和电位器电压也可得到一个电压差，而这个电压差可以控制舵机的正反转。因此采用 ARM 处理器的定时器输出占空比为 2.5%~12.5%的 PWM 波可以控制电机的正反转，

STM32F103C8 有 6 个定时器，其中定时器 9~14 号带有 PWM 功能，可以用它们分别控制胸鳍和尾鳍。在机器鱼两侧安装电机和主轴，电机固定在鱼身；主轴一端与电机相连，另一端安装套接件，可与胸鳍套接安装。电机带动主轴转动，主轴通过套接件带动胸鳍转动。

2.3.4 通信模块设计

仿生机器鱼通信系统包括无线串行通信模块和无线网卡通信 2 部分。在仿生机器鱼启动和 IP 配置时需要与 PC 机通过超级终端实时通信，而且要求是无线的；因此，选用较为稳定的汇承 hc-12SI4463 通信模块与北京华荣汇通信设备有限公司的 GW100B 通信模块，采用较为成熟的 FSK (frequency shift keying) 电路，可直接与 ARM 的串口连接。

3 技术实现

3.1 开发环境

作为科技创新类作品，为最终实现第二节设计目标，笔者制作的“浅水仿生机器鱼”实体推进系统舵机使用 WK-M0900 型号(输出力矩：6 kg·cm (4.8 V))，通信系统模块采用汇承 HC-12 SI4463 无线单片机串口模块。软硬件开发环境如表 2 所示。

表 2 软硬件开发环境

开发环节	开发工具
硬件开发环境	IBM T420, i5 处理器, 4 G 内存
控制部分	STM32F103C8 开发板
开发平台	KeilVision
开发语言	C 语言
策略控制语言	C++

3.2 技术实现

笔者使用 3 处关节和 3 个舵机的摆动来实现执行机构的设计，使用 2 个舵机来控制鱼的胸鳍。鱼头外壳以及胸鳍采用 PLA 塑料材料和 3D 打印技术实现，PLA 材料具有刚度好的优势，打印出来的模型硬度好，强度好，作为结构件经久耐用，并且收缩率低，即使打印尺寸较大的模型时也表现良好。部分零件如图 1 所示。



图 1 胸鳍辅助尾鳍模式“仿生机器鱼”零件

操控以打开位于鱼体上的开关为开始，然后对通信频率进行调谐，以实现控制信号的正确传送。若为手动控制，可以通过敲击之前设定好的功能键对机器鱼进行操控，实现下潜或上浮，通过开关尾部的舵机来实现鱼体的前进；若为代码测控，则需要对想要实现的操作进行编程，并编译成可执行的

策略文件，在放在机器鱼平台上进行自主控制。传输设备如图 2 所示。

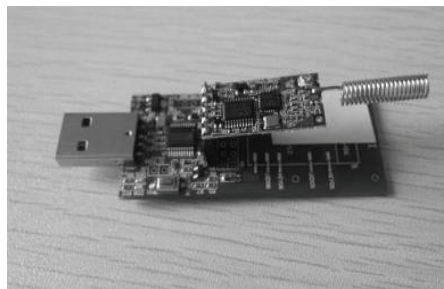


图 2 胸鳍辅助尾鳍模式“仿生机器鱼”传输设备

最终的作品效果如图 3 所示。



图 3 胸鳍辅助尾鳍模式“仿生机器鱼”

4 结束语

着眼于仿生机器鱼的推动机理，笔者将仿生学与物理、编程等结合起来，综合运动多学科知识，利用胸鳍作用配合辅助尾鳍推进，最终研究成功胸鳍与尾鳍推进模式相结合的仿生机器鱼，能够实现浅水中前进和左、右 90°范围转向，已在 2015 国际水中机器人大赛中获得优异成绩。

下一步，笔者的主要工作重点对后退环节进行改进并寻找新材料制作胸鳍，以取得更好效果。

参考文献：

- [1] 谢广明. 水中机器人(机器鱼)教育全局视觉系列教材: 全局视觉组机器鱼竞赛[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2013: 7-8.
- [2] 谢广明. 水中机器人(机器鱼)教育自主视觉系列教材: 自主仿生机器鱼[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2013: 4-6.
- [3] 王兆立. 仿胸鳍推进系统水动力性能理论与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [4] 洪梓榕, 李宗刚, 石慧荣, 等. 机械式胸鳍仿生机器鱼: CN, CN203186566 U[P]. 2013.
- [5] 魏清平, 王硕, 谭氏, 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.
- [6] 孙维维. 仿生机器鱼尾鳍推进系统的研究与设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2009.
- [7] 肖华, 黄河, 谢模焱. 全方位移动式网球机器人的研究与设计[J]. 机电工程, 2015, 32(4): 509.