

仿生长鳍波动推进系统研制的分析^①王 硕^② 董 翔

(中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学重点实验室 北京 100190)

摘 要 综述了模仿鳗科和裸背鳗科鱼类的高机动性的波动运动方式设计仿生长鳍波动推进(long-fin undulating propulsion)系统的研究,包括长鳍波动推进系统的推进机理、长鳍波动运动的运动学和动力学研究,以及仿生长鳍波动推进实验系统的研制。在此基础上,指出了今后研究的重点——鳗科和裸背鳗科鱼类游动的运动学、动力学分析;长鳍波动推进系统的机构设计与控制方法;长鳍波动推进系统的协调控制与导航方法。

关键词 游动机器, 自主水下航行器, 长鳍波动推进, 仿生机器鱼

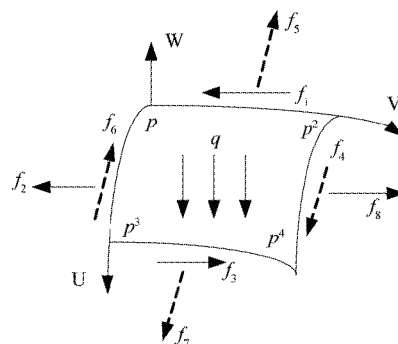
0 引 言

通过模拟自然界中生物系统的结构、功能来改进工程技术系统的设计,一直是国内、国际科学研究的一个重点。鱼类作为水中进化生物的佼佼者具有优异的水动力学外形,高超的水中运动技巧,卓越的机动能力,极高的运动效率,惊人的加速能力,持久的高速巡航能力,极强的适应能力,研究这些特点,可为设计新型船舶、运输工具、水下潜器找到多种不同的新思路,如减阻、低噪声驱动及其控制等。针对鱼类高效运动方式开展理论分析和实验研究,对于未来新型水下航行器的设计具有重要的理论意义和实用价值。本文对仿生长鳍波动推进(long-fin undulating propulsion)系统的研究进行了综述。

1 鱼类的运动方式

由于不同的鱼类生活在不同的环境中,并具有不同的与环境相适应的运动能力,所以面对不同的应用需求可以选取不同类型的鱼类进行模仿。对鱼类的模仿有很多不同的方面,这里主要讨论对鱼类的身体推进部分的结构、游动运动方式的模仿。一般来说,鱼类的运动方式有身体/尾鳍(body and/or caudal fin, BCF)推进方式和奇鳍/对鳍(median/paired fin, MPF)推进方式^[1,2]。目前研究较多的是BCF波动推进方式,这种游动方式的巡航速度快、效率高,能够以小于一个身长的转弯半径进行转弯,对

于高效、快速的运输工具和水下潜器的设计具有极好的借鉴意义^[3,4]。在此类研究基础上开发出了许多不同类型的基于BCF运动方式的仿生机器鱼^[5,6]。这种运动方式在静水环境、高速游动状态下是一种最优的运动方式,也是绝大部分鱼类所采用的运动方式。但在低速运动状态和要求高机动性的情况下以及在紊流环境复杂时,其效率却相当低^[7,8]。因此,在上述环境下工作的运载工具和潜器不适合采用BCF运动方式。而生活在类似环境下的自然界的鱼类,例如“尼罗河魔鬼”鱼、鳗鱼等,一般多采用如图1所示的奇鳍/对鳍波动推进方式,因此研究这类鱼类的推进方式对于设计复杂紊流环境下低速、高机动性运动的新型运载工具和潜器具有重要的理论和应用价值。由于MPF运动方式的鱼类用于推进的部分是由多根鳍条和连接薄膜组成的鱼鳍,本文将模仿这种鱼鳍而设计的推进系统称

图1 薄膜微元单元上的受力^[9]

① 863 计划(2006AA11Z225)和国家自然科学基金(60605026,60635010,60725309)资助项目。

② 男,1973 年生,副研究员;研究方向:仿生机器人,多机器人;联系人,E-mail: shuo.wang@ia.ac.cn (收稿日期:2007-12-29)

为仿生长鳍波动推进系统,并将国内外研究机构针对这一仿生推进系统开展的工作进行了总结归纳和分析。

本文从仿生长鳍波动推进系统的推进机理、动力学分析和实验系统开发等方面介绍国内外已开展的研究工作。在推进机理方面主要涉及鱼类波动运动的观测方法、数学描述,波动推进的水动力学理论分析手段,以及基于数值仿真的分析;在实验系统方面介绍了新加坡南洋理工大学、日本大阪大学、美国西北大学、英国 Heriot-Watt 大学以及我国的国防科技大学等机构开发的典型系统及相关研究成果。基于文献分析,归纳了仿生长鳍波动推进系统的主要研究内容和研究方向。

2 长鳍波动推进模式的理论分析

采用长鳍波动推进模式的鱼类在加速性能和巡航能力上较差,但在机动性能上确是比较出色的。在对这些鱼类的运动模式分析中,利用水动力学理论分析和对特定鱼类的观测数据进行处理是两种主要的研究方法。国外 Lighthill、Blake 等学者在鱼类推进方式的运动规律、建模和推力、功率估算上,利用水动力学原理和数学工具完成了很多非常基础的研究工作^[10-13]。此后开展的大量动力学和仿生机器人系统设计、控制的研究工作多与这些理论研究成果密切相关。

对特定鱼类的观测数据进行处理的方法是建立特殊的生物运动观察和测量系统,获取鱼类运动时的姿态和外形的变化、肌电信号等数据,然后采用数据处理方法将其特征进行提取并建立相应的数学模型。我国国防科技大学的研究人员利用数字摄像机对鱼缸中的“尼罗河魔鬼”鱼运动进行记录,然后通过图像处理算法将其波动运动的长鳍边缘的实时变化数据提取出来,用这些数据就可以建立长鳍边缘波动运动的外包络线^[14]。新加坡南洋理工的研究人员也通过观察对长鳍波动运动规律进行了总结^[15]。

依据 Lighthill 提出的细长体理论,这种波动运动的长鳍的边缘可以描述为如下函数:

$$\begin{aligned} h(x, t) &= h_1(x) \cdot \sin(kx + \omega t) \\ &= h_1(x) \cdot \sin(2\pi kx + 2\pi ft) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 k 为完整波数, f 为鳍条摆动频率。目前绝大多数仿生长鳍推进机构的控制都是基于这一波动运动方程进行设计的。方程(1)仅仅给出了波动长鳍的运动学描述,但由于鱼鳍的柔性,实际鱼类长鳍的

波动运动应该比这一简化模型更为复杂,鱼鳍与水之间相互作用产生升力和推力的方式还需要进一步应用水动力学的原理进行分析。

文献[7]中对分析鱼鳍与水之间相互作用的水动力学原理进行了归纳,介绍了三种理论分析方法:促动盘理论(actuator-disk theory),大摆幅细长体理论(large-amplitude elongated body theory)和应用叶片元分析扩展的波动板理论。不过鱼鳍与水的相互作用是一个相当复杂的水动力学问题,在理论分析的基础上进行有限元分析和计算也是一个复杂困难的问题。

针对这一波动长鳍的水动力学建模问题,文献[9]基于柔性薄壳理论进行了理论分析。在笛卡尔坐标系下,一个长鳍的简化三维空间几何模型首先建立起来。然后,给出长鳍上支撑柔性薄膜的鳍条的运动方程。鳍条的运动引起薄膜上各点的运动和薄膜变形。将薄膜划分为若干微小的曲面(微元),在简化的三维空间几何模型上可以分析得出各个微元的位移、速度和形变量,与鳍膜材料弹性模量和厚度相关的各方向上的拉力和剪切力的计算公式。微元上的受力如图1所示,其中 q 为作用在薄膜上的外力。在此基础上,可以进一步建立微元上的受力平衡微分方程,通过积分运算就可以得出整个微元上所受的载荷力。在给定边界条件下推导出了鳍条受力和柔性薄膜鳍面受力的表达式。

在文献[16]中采用简单的水动力学公式和有限元分析方法给出了一种简单的长鳍推进力的计算方法,并给出了几种不同情况下的仿真结果。主要依据是水动力学公式

$$F_n = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C \cdot S \cdot \|v_n\|^2 \cdot u_v \quad (2)$$

其中 F_n 是流体作用在推进单元 n 上的力, ρ 为流体密度, C 为阻力系数, S 是推进单元的有效迎流面积, v_n 是推进单元的速度, u_v 是沿速度方向上的一个单位矢量。

将波动运动过程中相邻两鳍条间的柔性鳍面简化为两个三角形平面进行处理,形成如图2(a)所示的理想化的长鳍推进器模型,在鳍面上建立若干微元,并依据公式(1)计算微元上的受力,将一个波动周期内微元上的受力分解到 X 、 Y 、 Z 轴上,而后通过积分运算获得整个长鳍在一个波动运动周期内在各个方向上所产生的侧向力、升力和推力。图2(b)中给出了仿真计算得出的前进时长鳍鳍面上的压力分布情况,图中每个微元面积为 1mm^2 ,灰度变化显

示微元表面每平方毫米上作用力的大小。

上述两篇文献都是针对长鳍推进器的结构分别采用数值仿真、力学建模进行了分析。相对于文献[9]来说,文献[16]忽略了鳍面的弹性等因素,利用

有限元方法和基本水动力学原理对推进力进行了估计和计算;而文献[9]考虑的情况相对复杂,建立了长鳍上微元受力的理论模型,为分析仿生长鳍推进力的产生机制进行了有益的探索。

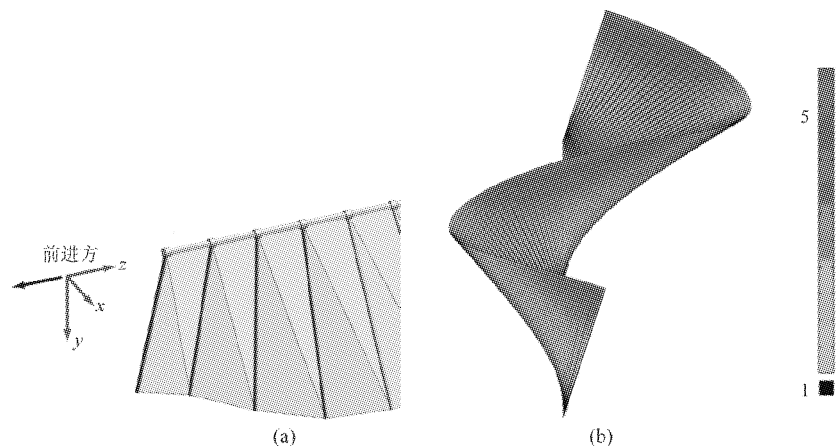


图 2 理想化的长鳍推进器模型(a)和前向运动时长鳍上压力分布仿真(b)^[16]

尽管国内外的学者在这一领域开展了大量研究工作,但鱼类在复杂流场下依靠柔性长鳍波动运动实现三维空间自由运动的水动力学机制仍然没有完全揭示,很多复杂的生物水动力学问题仍然吸引着众多学者进行深入研究。

3 长鳍波动推进实验系统

在长鳍波动推进的运动机理和水动力学研究基础上,很多研究人员开始设计长鳍波动推进实验装置,通过实验装置来验证波动运动机理,研究新型推进系统的设计与控制方法。

如图 3 所示,新加坡南洋理工大学(NTU)仿照鳐鱼研制开发的长鳍波动推进系统。该系统长鳍的鳍条和鳍面均为硬质材料制成,一个鳍条与一个鳍面为一组,相邻的两组中其鳍面相互重叠并以滑动轴承连接,从而保证不同鳍条在一定空间内可以自由运动^[15]。长鳍的运动为正弦周期运动,可以通过调整长鳍的波动频率和各鳍条之间的相位差来进行

速度控制^[17]。当系统两侧均安装长鳍时,通过控制两个长鳍上行波间的相位差可以实现运动方向调整。

图 4 所示为日本大阪大学(Osaka University)研制的依靠两侧长鳍波动推进的游动机器原型系统。该系统的鳍条为刚性材料制成,每个鳍条由一个舵机驱动,每侧的鳍条由一完整的长条形鳍面连接在一起,每个鳍面长为 577mm,宽为 75mm,厚度为 0.5mm。整个游动系统的长度 1000mm,宽为 521mm,厚度为 66mm。通过两侧长鳍按正弦规律波动运动。在鳍条最大摆幅分别为 30°、45°,长鳍上的波数分别为 1、1.5 和 2,长鳍的波动频率分别为 1Hz、1.5Hz 和 2Hz 的情况下完成了长鳍波动运动的游动实验。通过两侧长鳍的协调运动给出了绕 X 轴、Y 轴和 Z 轴转动的基本控制方法。对两侧长鳍协调控制进行转动运动时的转矩进行了测量。系统的最大游速接近 0.5m/s,最大角速度接近 1rad/s^[18]。

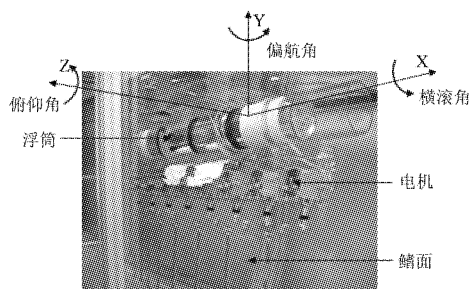


图 3 新加坡南洋理工大学研制的长鳍波动推进实验系统^[15,17]

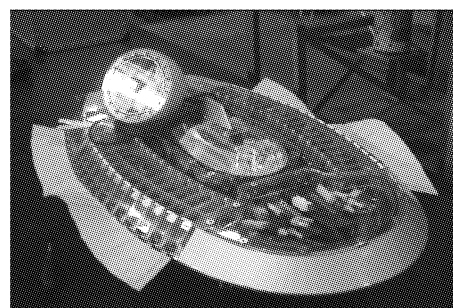


图 4 日本大阪大学研制的两侧长鳍波动推进系统^[18]

美国的西北大学(Northwestern University)也研究了长鳍波动推进运动产生推力的机理,并建立了如图5所示的长鳍波动推进实验系统^[16,19]。该长鳍机构利用8个舵机分别驱动8根鳍条,由0.025mm厚的薄膜作为鳍面,长鳍的总长度为231mm。以长鳍波动运动控制的三个主要参数(f 为长鳍波动频率; Θ 为鳍条最大摆幅; w 为长鳍的波动运动波长与其鳍长之比值)为基础建立控制参数空间。确定控制参数的取值范围为

$$\{(f, \Theta, w): 0 < f \leq 3, 0 < \Theta \leq 35, 0 < \frac{1}{w} \leq \frac{N-1}{2}\} \quad (3)$$

其中 N 为鳍条总数。通过在如公式(3)所示的给定控制参数空间内选取不同的控制参数(f, Θ, w)组合;针对不同控制参数组合,通过数值仿真进行推进力估算,同时利用长鳍波动推进实验装置测量实际的推进力。实验结果显示该系统在($f = 2\text{Hz}, \Theta = 25^\circ, w = 2.8$)时获得了最大推力值 333mN ^[19]。

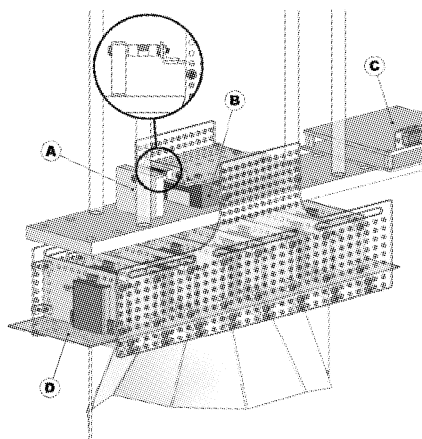


图5 美国西北大学研制的长鳍波动推进实验系统^[19,20]

中国国防科技大学(NUDT)在2003年就开展了对“尼罗河魔鬼鱼”游动机理的研究工作,并在此基础上研制开发了如图6所示的长鳍波动推进系统。该系统也是采用鳍面和波动鳍条相结合的结构。鳍条长度设计为等长的结构,而鳍面的几何形状按照



图6 国防科技大学研制的长鳍波动推进系统^[22]

鳍面各种动态参数下平均内应力最小准则进行设计。整个长鳍波动推进系统共由13根鳍条组成,各鳍条均有一个特定的凸轮机构与之相连,由一个电机来驱动这些凸轮机构使鳍条、鳍面波动运动^[21]。

英国 Heriot-Watt 大学的 Sfakiotakis 教授对在不同种类鱼类运动模式、运动规律和水动力学分析方法方面已经取得的研究成果进行了细致地总结和归纳^[2]。特别是针对长鳍波动推进系统,他还设计了基于平行皮腔致动器(parallel bellows actuator, PBA)驱动的鳍条结构和控制方法^[23]。

此外,爱沙尼亚的 Tartu 大学也开展了相关工作,其研究重点在于如何利用电活性聚合物(electro-active polymers, EAP)研制驱动器并驱动鳍条运动^[24]。中国科学院自动化研究所设计了仿生长鳍波动推进实验装置,给出利用中央模式发生器(central pattern generator, CPG)模型进行仿生长鳍波动运动控制的方法,并利用激光测距仪对长鳍不同波动频率下的推进速度进行了测量^[25]。

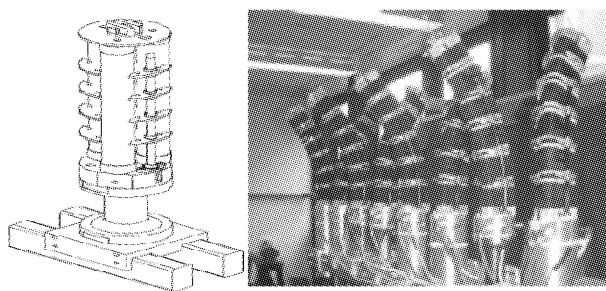


图7 英国 Heriot-Watt 大学研制的 PBA 驱动的多鳍条^[24]

4 长鳍波动推进研究的主要内容

目前,国内外的学者在长鳍波动推进系统方面已开展了大量研究工作。但鳐科和裸背鳗科鱼类的游动机理作为一个复杂的科学问题仍然有待进一步探索、揭示。而模仿这些鱼类运动模式的长鳍波动推进系统还存在许多理论、方法和关键技术上的难点需要逐一克服。通过对以上文献的综合归纳,在长鳍波动推进系统分析与设计中需要重点开展以下研究工作:

(1) 鳐科和裸背鳗科鱼类游动运动的机理研究,主要包括鱼类游动时的运动学分析和动力学分析。已有的研究工作表明鱼类通过波动运动在水中制造一系列漩涡并产生推力,但这些鱼类是如何通过控制长鳍的波动产生侧向力和升力方面的研究还较

少,而侧向力和升力对机动性具有重要作用,可以为设计高机动性的推进系统奠定理论基础。同时,在复杂流场下,鳐科和裸背鳗科鱼类如何保持姿态的水动力学分析也是非常复杂的问题。在运动机理的研究中,可以采用实验观察、理论分析和数值仿真等方法。如,利用数字粒子图像速度测量技术(digital particle image velocimetry, DPIV)对长鳍波动产生的流场进行分析,总结长鳍波动运动与漩涡之间的关系;通过采集并分析长鳍鱼类游动时的肌电信号了解其如何协调控制鳍条运动应对外部流场变化;通过水动力学的分析弹性波动长鳍与液体之间的作用力,并建立更简单、合理的力学模型;利用有限元方法和数值仿真定量分析波动长鳍的受力。由于对自由状态下的长鳍鱼类进行各种测量存在很多困难,设计仿生长鳍推进系统,模仿鱼类的结构和运动,测量长鳍上的作用力并结合理论研究进行分析将有助于加深、扩展对鱼类游动机理的认识。

(2)长鳍波动推进系统的机构设计与控制方法研究,主要包括长鳍波动推进系统的机械结构设计、驱动系统的设计、鳍条运动的控制方法等。在机构设计中主要研究体长与鳍的长度、鳍的宽度的合理比例以优化推进力,系统外壳的流线型形状以减少水下阻力,长鳍上鳍条的位置分布、鳍条和鳍面的弹性系数等。这方面研究可以结合理论研究进行数值仿真或通过水动力学实验来完成优化设计。在驱动系统方面,针对适当的鳍条驱动器及其传动系统开展研究。一般驱动系统采用电机驱动或非电机驱动。采用单电机驱动利用特殊的机械传动系统驱动多个鳍条协调运动,控制相对简单;利用多个电机驱动多个鳍条,传动系统相对简单,但控制较复杂,有利于实现多种不同的长鳍波动。采用 EAP、形状记忆合金、压电陶瓷等驱动器也可以用来驱动鳍条,但与电机相比输出功率较小,目前仅适合于微小型装置使用。不过采用新型材料开发高效、低耗的人工肌肉驱动器对于设计低噪声的推进系统有特殊意义。鳍条运动的控制方法主要有控制鳍条的波动频率、波动幅度、波动中心偏移,各鳍条波动的相位差等方法。但各具体的控制方法还要充分考虑到机构和驱动系统结构等约束限制。

(3)长鳍波动推进系统的协调控制与导航方法研究,主要包括游动运动控制、姿态控制、路径规划与导航等研究。在速度控制方面主要研究加速/减速、巡航、快速启动、转弯/机动运动等。在姿态控制中主要研究流场变化时如何保持姿态稳定。在路径

规划和导航方面,其研究内容同其他水下运载器相关研究类似。这些研究工作需要在深入了解控制对象的基础上,通过信息融合、系统辨识、智能控制等理论和方法的结合、创新来加以解决。

5 结 语

经过自然界的自然选择和进化,鳐科和裸背鳗科鱼类形成了独特的依靠长鳍波动运动的游动方式,具有了极高的运动效率和良好的机动性能。国内外的学者很早就注意到鱼类这些优异的游动性能和游动技巧,并开展了大量研究工作以期设计新型的高效、高速、高机动性运载器。由于国内外比较关注高效率、高巡航速度鱼类的运动机理、系统设计和控制等研究工作,因此对具有高机动性的鳐科和裸背鳗科鱼类的运动机理、机构设计和控制方法方面的研究相对较少。因此,本文将针对高机动性的鳐科和裸背鳗科鱼类开展的研究工作进行了概述。从长鳍波动推进的运动学、动力学及其数值仿真三方面介绍了相关研究情况。在长鳍波动推进实验系统方面介绍了国内外研究机构研制的实验装置。在此基础上,进一步归纳了长鳍波动推进系统及其分析的主要研究内容和研究思路。希望通过本文能够促进基于长鳍波动推进的新型高机动性水下运载器的研究与研制。

参考文献

- [1] Lindsey C C. Form, function and locomotory habits in fish. In: Fish Physiology. Vol. VII Locomotion. New York: Academic, 1978. 1-100
- [2] Sfakiotakis M, Lane D M, Davies B C. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1999, 24(2): 237-252
- [3] Lighthill M J. Note on the swimming of slender fish. *J Fluid Mech*, 1960, 9: 305-317
- [4] Triantafyllou M S, Triantafyllou G S, Yue D K P. Hydrodynamics of fishlike swimming. *Annu Rev Fluid Mech*, 2000, 32: 33-53
- [5] Triantafyllou M S, Triantafyllou G S. An efficient swimming machine. *Scientific American*, 1995, 272: 64-70
- [6] 王硕,谭民. 机器鱼. 北京:北京邮电大学出版社, 2006
- [7] 沈林成,王光明. 仿鱼长鳍波动推进器研究的进展与分析. 国防科技大学学报, 2005, 27(4): 96-100
- [8] Webb P W. The biology of fish swimming. In: Mechanics and physiology of animal swimming. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 45-62

- [9] 王光明,胡天江,沈林成. 仿鱼柔性长鳍波动运动分析与建模. 动力学与控制学报,2006, 4(4): 348-352
- [10] Blake R W. Swimming in the electric eels and knife-fishes. *Can J of Zoology*, 1983, 61: 1432-1441
- [11] Lighthill M J, Blake R W. Biofluidynamics of balistiform and gymnotiform locomotion Part 1: biological back ground, and analysis by elongated-body theory. *J Fluid Mech*, 1990, 212: 183-207
- [12] Lighthill M J. Biofluidynamics of balistiform and gymnotiform locomotion Part 2-4. *J Fluid Mech*, 1990, 213: 1-28
- [13] Sparenberg J A. Survey of the mathematical theory of fish locomotion. *Journal of Engineering Mathematics*, 2002, 44: 395-448
- [14] 胡天江,李非,沈林成. “尼罗河魔鬼”长背鳍波动包络线的提取算法. 国防科技大学学报,2005,27(5): 67-72
- [15] Low K H, Willy A. Development and initial investigation of NTU robotic fish with modular flexible fins. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, Niagara Falls, Canada, 2005. 958-963
- [16] Epstein M, Colgate J E, Maciver M A. A biologically inspired robotic ribbon fin. <http://www.neuromech.northwestern.edu>; Malcolm MacIver and Johannes Zimmer, 2005
- [17] Low K H. Locomotion consideration and implementation of robotic fish with modular undulating fins: analysis and experimental study. In: Proceedings of 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, 2006.2424-2429
- [18] Toda Yasuyuki, Ikeda Hirofumi, Sogihara Naoto. The motion of a fish-like underwater vehicle with two undulating side fins. In: Proceedings of the 3rd International Symposium on Aero Aqua Bio-mechanisms, Okinawa, Japan, 2006. Paper ID: P28
- [19] Epstein M, Colgate J E, MacIver M A. Generating thrust with a biologically-inspired robotic ribbon fin. In: Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, 2006.2412-2417
- [20] Maciver M A. Research on the interplay of biomechanics and the nervous system: neuromechanics, neuroethology, robotics, and simulation, using weakly electric fish as a model system. <http://www.neuromech.northwestern.edu>; Malcolm MacIver and Johannes Zimmer, 2008
- [21] 徐海军,潘存云,谢海斌. 仿鱼柔性长背鳍波动运动机构的设计与仿真. 机械制造,2005, 43(493): 21-22
- [22] 谢海斌,张代兵,沈林成. 基于柔性长鳍波动推进的仿生水下机器人设计与实现. 机器人,2006, 28(5): 525-529
- [23] Sfakiotakis M, Lane D M, Davies B C. An experimental undulating-fin device using the parallel bellows actuator. In: Proceedings of the 2001 IEEE international conference on robotics and automation, Seoul, Korea, 2001.2356-2362
- [24] Anton M, Punning A, Aabloo A, et al. Towards a biomimetic EAP robot. In: Proceedings of Towards the Autonomous Mobile Robots (TAROS 2004), Essex, United Kingdom, 2004
- [25] Dong X, Wang S, Cao Z, et al. CPG based motion control for an underwater thruster with undulating long-fin. In: Proceedings of the 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea, 2008.5433-5438

A review of the latest developments in biomimetic long-fin undulating propulsion research

Wang Shuo, Dong Xiang

(Key Laboratory of Complex Systems and Intelligence Science, Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract

The paper surveys the research advances in design of biomimetic long-fin undulating propulsion systems by imitating rajiform and gymnotiform fishes, unique and excellently maneuverable undulating motions, including the kinematic and dynamic analyses of long fins' undulating motions, and the design and fabrication of experimental systems for biomimetic long-fin undulating propulsion. And on the basis of this, the focal points of the future research is given, which involve kinematic and dynamic analyses for rajiform and gymnotiform fishes, mechanical design and control of long-fin undulating propulsive systems, coordinated control and navigation control for long-fin undulating propulsive systems.

Key words: swimming machine, autonomous underwater vehicle, long-fin undulating propulsion, biomimetic robotic fish