

仿生机器鱼研究的进展与分析

喻俊志¹, 陈尔奎², 王 硕¹, 谭 民¹

(1. 中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学实验室, 北京 100080; 2 中国矿业大学 信电学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 介绍了仿生机器鱼具有效率高、机动性好、噪音低、对环境扰动小的特点和几种分类方法, 以及国内外在鱼类推进机理和仿生机器鱼研制方面的成果和现状, 在此基础上分析了机器鱼研究的主要内容: 鱼类推进理论模型、仿生机器鱼机械结构、仿生机器鱼游动的推进速度、运动方程、 Q 效率、 Q 功率等方面的客观规律, 特别是其控制性能和相关技术问题。

关键词: 仿生机器鱼; 推进机理; 现状; 控制性能

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Research evolution and analysis of biomimetic robot fish

YU Jun-zhi¹, CHEN Er-kui², WANG Shuo¹, TAN Min¹

(1. Lab for Complex System and Intelligence Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. College of Information and Electrics, China University of Mining and Technology, Jiangsu Xuzhou 221008, China)

Abstract: Some classifying methods, the characteristics and the current situation of both propulsive mechanism and development at home and abroad towards robot fish were presented. The design of underwater vehicle was characterized by high-speed, high-efficiency, good-maneuverability, low-noise and easy-hide. Based on the former, the research involved rules of the following: propulsive mechanism of fish, mechanic structure of biomimetic robot fish, propulsive speed of robot fish, function of robot fish movement, Q efficiency, Q power, etc. The control performance and technical problems of this study were discussed as well.

Key words: biomimetic robot fish; propulsive mechanism; current situation; control performance

1 引言(Introduction)

由于生物科学和工程技术科学的发展, 近年来兴起一股机器人仿生研究的热潮. 鱼类作为自然界最早的真骨类脊椎动物, 种类繁多, 生活环境各异. 为了攫取食饵、逃避敌害、繁殖后代和集群洄游等生存需要, 鱼类经过亿万年的自然选择, 进化出了非凡的水中运动能力, 既可以在持久游速下保持低能耗、高效率, 也可以在拉力游速或爆发游速下实现高机动性^[1]. 鱼类在水中的自主游动, 其速度或效率不能说达到了最优, 但其整体性能却接近最优. 正是鱼类在水中运动的完美性, 吸引生物学者研究鱼类的运动机理^[2], 机器人学者则希望制造出和真鱼一样的人工机器鱼^[3-10].

仿生机器鱼参照鱼类游动的推进机理, 利用机械、电子元器件或智能材料^[11](smart material)来实现水下推进的运动装置. 通过深入研究鱼类游动的推进机理, 一方面, 可以揭示鱼类高效游动的奥秘, 了解鱼类游动的力学效应对鱼类的生理学、生态学、动物行为、微观进化和宏观进化的影响; 另一方面, 也为研制高效率、低噪声、高机动性、高稳定性和易隐蔽的仿生航行体提供了新的思路. 21 世纪是人类开发海洋的世纪, 随着海洋开发需求的增长及技术的进步, 适应各种非

结构化环境的水下机器人将会得到迅猛的发展^[12]. 可以预见, 仿生机器鱼(以下简称机器鱼)以其效率高、机动性好、噪音低、对环境扰动小的优势将在以下领域得到广泛应用:

- 1) 要求作业时间长、范围大, 但本身承载能力或承载空间有限、不能加载太多能源的场合;
- 2) 要求机动性能高的场合, 如管道检测, 管道内部结构复杂, 采用微小型机器鱼可较好地完成作业任务;
- 3) 海洋生物观察. 常规螺旋桨推进器噪声大, 对环境的扰动大, 使水下运动装置很难接近所要观察的海洋生物, 采用微小型机器鱼有望解决这一问题;
- 4) 海底勘探及海洋救助等. 采用仿生推进方式可以容易地进入环境复杂的海洋空间, 如沉船内部, 珊瑚礁群, 完成常规潜器所不能完成的作业任务;
- 5) 军用方面. 由于机器鱼噪声低、对环境扰动小、不易被声纳发现、易于隐蔽, 它不仅为人们研制新型高效、低噪声、机动灵活的柔性潜艇提供了新的思路, 而且可直接进行水下侦察, 发现敌方雷区, 跟踪及摧毁敌方潜艇^[13].
- 6) 娱乐方面. 目前, 新的机器人技术正越来越多地应用于玩具制造业. 自 1999 年 6 月日本索尼公司推出“Aibo”机器

狗,“机器宠物”的概念便风靡全球.2000年3月,在东京玩具展览会上,日本第三大玩具制造商 Takara 公司展出了一系列机器鱼“Aquaroid Fish”,包括机器水母和机器蟹^[14].2001年1月,三菱重工(MHI)开始生产面向市场的机器鱼“Mitsubishi Animatronics”,该鱼仿照一种已经灭绝的腔棘鱼外形制造,是世界上第一条采用无线控制的“宠物鱼”^[15].随着制造工艺的进步和技术创新,“宠物鱼”将以优美的姿态和低廉的价格走向市场.

自1926年 Breder 开始对鱼类的游动机理研究^[16]以来,伴随着科学技术的发展和科研条件的进步,机器鱼的理论和实验研究已渐显规模.

2 仿生机器鱼的分类(Classification of biomimetic robot fish)

2.1 按鱼类游动推进模式分类(Classification according to propulsive modes)

对鱼类游动的推进模式和推进机理的研究是仿生机器鱼研究的理论基础.在自然界,为了适应环境,鱼类进化出各式各样的运动形式如游动、潜伏、滑翔、射流反冲推进等.对流体力学和生物学者来说,其兴趣主要在于鱼类游动的周期性运动.1926年 Breder 首先对鱼类游动的推进模式进行了分类,为以后的鱼类推进机制分类奠定了一个框架.1984年, P. W. Webb 根据鱼类推进所使用的身体部位的不同,将鱼类游动的推进模式分为两类:身体/尾鳍推进模式(body and/or caudal fin, 简称 BCF)和中央鳍/对鳍模式(median and/or paired fin, 简称 MPF)^[2,17].按照这种分类方法,机器鱼可以分成两大类:BCF 式和 MPF 式.图1给出了鱼体形态特征描述的有关术语^[2].图2给出了 P. W. Webb 关于鱼类游动推进模式的分类和特点^[17].

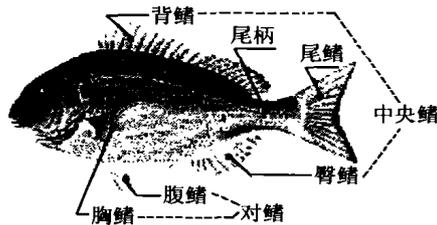


图1 鱼体的形态特征描述术语
Fig. 1 Terminology used to describe the fins and other features of fish

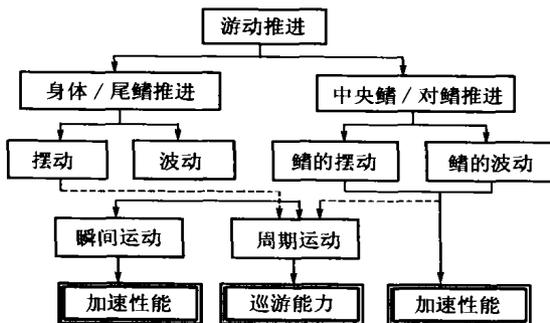


图2 鱼类游动推进模式的分类及功能
Fig. 2 Classification and function of swimming fish propulsion

按照鱼类推进运动的特征,机器鱼可以分成波动式机器鱼和摆动式机器鱼.波动式是指在游动过程中整个推进结构都参与了大振幅的波动,并且在推进长度上至少提供一个完整的波形.摆动式是指推进结构绕着基体转动,并不呈现波的形状.一般来说,波动式常指身体波动式,摆动式常指尾鳍摆动式.相对于尾鳍摆动式而言,身体波动式推进效率较低,但机动性较好.而尾鳍摆动式具有很高的推进效率,适于长时间、长距离巡游,不足之处是机动性较差.

此外,从机器鱼推进器的设计和应用出发,按照鱼体的形态及运动形式^[1,2],机器鱼又可以分成鳗鲡模式(anguilliform mode)机器鱼、鲷科模式(carangiform mode)机器鱼、鲹科加月牙尾推进(thunniform mode)机器鱼和胸鳍摆动/波动式机器鱼.前三种模式的主要区别在于产生推进运动的身体波的特征:

- 1) 鳗鲡模式是指整个鱼体从头到尾都作波状摆动,而且波幅基本不变,其特点是行进单位距离所需能量最少.
- 2) 鲷科模式的波动主要集中在身体后 2/3 部分,推进力主要由具有一定刚度的尾鳍产生,推进速度和推进效率较鳗鲡模式高,在速度、加速度和可控性三者之间有最好的平衡.
- 3) 在鲹科加月牙尾推进中,鱼的前体基本失去柔性,推进运动仅限于身体后 1/3 部分,特别是尾鳍至尾柄处.通过具有一定刚度、高展弦比尾鳍的运动,鱼体产生超过 90% 的推进力.该模式适于长时间高速巡游,海洋中游速最快的鱼类如鲨鱼和金枪鱼几乎都采用该推进模式.快速(巡游速度高达 20 节)和高效推进(流体推进效率高达 80% 以上)的优点,使鲹科加月牙尾推进成为仿生推进研究的热点.
- 4) 胸鳍摆动/波动式推进所产生的推进力和推进效率最低,大部分鱼类主要通过胸鳍的摆动/波动来提高游动的机动性或作辅助推进.

2.2 按机器鱼体积分类(Classification according to fish's dimension)

目前,仿鱼推进技术的研究还没有达到实用程度,但各种各样针对理论研究和性能验证的机器鱼设计正在实验室进行.从体积的角度来划分,可分为常规机器鱼和微小型机器鱼.常规机器鱼的研究与开发,旨在设计一种快速、高效、可操纵的水下推进装置,试图在水下潜器和水下机器人领域取代螺旋桨等常规推进器.随着微机电系统(MEMS)的发展,微小型机器鱼特别是液体中泳动微机器人成为越来越受到关注的前沿研究课题之一.液体中泳动微机器人的研究,将为液体微管道机器人提供一种重要的形式,同时为血管机器人的研究提供基础^[18].

2.3 按机器鱼驱动方式分类(Classification according to drive modes)

按照驱动方式的不同,国内外现已开发的机器鱼可分为两类:一类是采用液压、电磁马达等常规驱动元件的机器鱼,另一类是采用智能材料(smart material)如形状记忆合金(SMA)、压电陶瓷(PZT)和采用特殊发动机如半自由活塞型斯特灵发动机^[19](semi-free-piston stirling engine)等特殊驱动元件驱动的机器鱼.

3 仿生机器鱼的研究现状 (Current researches on biomimetic robot fish)

经过数百万年的自然演化,持久的速度、迷一般的效率和大的推重比,鱼类及鲸豚类以高超的游泳技巧远高明于人类现有的航海技术,而它们流线形身体具有流体力学分析的最佳性能,更为造船工程学者所赞叹.1936年,英国生物学家 James Gray 发表论断,估算出海豚的肌肉所能提供的功率只相当与它身体相似的刚体模型以 15~20 节的时速前进时所需功率的 1/7. Gray 从能量守恒的角度向流体力学者提出了一个疑题:海豚的游动效率远远超出了 100%^[20].人们将这个结论推广到整个鱼类,称为 Gray 悖论 (Gray's paradox).直到今天,Gray 悖论还激励着广大科学工作者以精确的科学方式证明其对错.关于仿生机器鱼的研究主要分为两个阶段:20 世纪 90 年代以前主要集中于基础理论的研究,90 年代以后随着机器人学、新型材料和驱动装置的进步才开始真正意义上的机器鱼研制.

3.1 国外研究现状 (Recent situation of oversea researches)

3.1.1 鱼类推进机理研究现状 (Current study on propulsive mechanism of fish)

对鱼类推进模式的研究是仿生机器鱼研制的基础,国外学者很早就致力于这方面的工作.表 1 给出了当前国外与鱼类推进研究相关的一些研究机构.

表 1 国外与鱼类推进研究相关的研究机构

Table 1 Foreign research institutes relating to fish propulsion

国别	研究单位	研究内容
美国	MIT, M. Triantafyllou 研究组	涡流控制和减阻机制
	北亚利桑那州大学,生物系	鱼类游动行为
	Vasaar 学院,生物力学实验室	
	加州大学动物系	鱼类推进数学模型
	Lafayette 大学,数学系	鱼类推进的数学模型
	康涅狄格大学	鱼类游动的结构和功能
	南加州大学	游动和飞行的研究
加拿大	渥太华大学	鳗鲕目推进
	东海大学, Kato 实验室	电子鱼研究项目
日本	东京工学院,机械动力学和控制实验室	胸鳍推进
	运输省,船舶技术研究所	驱动装置、机动性研究 (SRI)

2000 年麻省理工学院 (MIT) 的 M. Triantafyllou 研究组 (以下简称 MT) 在对鱼类推进机理研究的综述^[21,22]中指出:

1) 描述鱼类尾迹的三维非定常流动的力学模型尚不完善;

2) 鱼类游动的高效、高速源自涡控制; MT (1999) 用 Robotuna 放在拖曳水池中做模拟活鱼阻力实验,实验结果表明:如果机器鱼处于低推进效率时,“活”鱼的阻力会比死鱼大许多;只有当机器鱼的波状游动处于最佳推进效率范围,

“活”鱼才会大大减阻,相对于死鱼可减阻 50% 以上.减阻的原因在于鱼善于利用尾鳍进行涡控制,从而达到理想的推进效率.对拍动翼 (主要模仿鳐科加月牙尾推进模式) 的推进性能研究发现,影响其推进性能的参数主要有 5 个:① 沉浮振幅与翼弦长度之比;② 名义攻角;③ 沉浮与俯仰两种振动的相位差;④ 无量纲频率 (斯德鲁哈尔数 St);⑤ 俯仰轴在翼弦上的相对位置.从游动显示的尾迹形态来看,当尾迹呈现反向卡门涡街 (Karman vortex street) 形态时,推进效率将会上升;

3) 尾迹的反向卡门涡街形态可以采用量化的三维粒子影像测速法^[23]观测,或采用数值仿真方法计算;

4) 鱼类游动的快速性、高效性和身体的 C 形有关.

3.1.2 仿生机器鱼研制现状 (Current development of robot fish)

随着高新技术的发展,1994 年 MT 研究组成功研制了世界上第一条真正意义上的仿生金枪鱼 (Robotuna),开启了机器鱼研制的先河.此后,结合仿生学、材料学、机械学和自动控制的新发展,机器鱼研制渐成热点,表 2 给出了国外一些典型的机器鱼研究项目.从表中可以看出,美国和日本进行的机器鱼研究比较多,取得的成果也比较多.

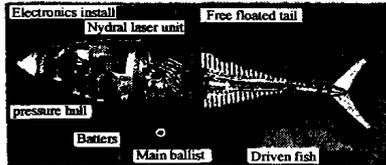
表 2 国外典型的仿生机器鱼研究项目

Table 2 Foreign typical research projects on robot fish

国别	研究单位	研究内容
美国	MIT	第一条机器鱼 Robotuna (1994 年) Robotuna 改进版 Pike (1995 年) Robotuna 最高版 VCUUV (1998 年) 拍动翼研究
	中佛罗里达大学	微电子机器鱼 (应用 SMA 技术)
	德州农工大学	仿生驱动材料研究
	东北大学	仿生水下机器人项目 (鳗鲕目推进)
	波士顿大学	机器鱼推进建模
	加州理工大学	机器鱼推进的传感和控制
	比利时	Vrije 大学
英国	Heriot-Watt 大学	FLAPS 项目
	东海大学, Kato 实验室	人工胸鳍黑鲈 (Blackbass)
日本	名古屋大学	微型水下仿胸鳍模式浮游机器人 (压电陶瓷驱动)
	Takara 公司	微型身体波动式水下推进器 (形状记忆合金驱动)
	三菱重工	机器鱼, 机器水母
	运输省, 船舶技术研究所 (SRI)	机器鱼 “Mitsubishi Animatronics” PF-300, PF-600, F-FPSE200, PF-700, UPF-2001, PPF-09

在美国,1994 年,世界上第一条机器鱼 Robotuna 在 MIT 诞生,其研究目的是研制一种能克服目前水下潜器连续工作

时间短、高效、快速的水下推进系统. 该鱼长约 1.2 m, 通过躯体和尾鳍的摆动, 能像真鱼一样游动, 速度可达 2 m/s. 1995 年, MIT 推出了 Robotuna 的改进版机器鱼“Pike”, 旨在研究鱼的机动性和静止状态下的加速性. 1998 年, Draper 实验室推出了 Robotuna 的最高版本 VCUUV^[3,24] (vorticity control unmanned undersea vehicle), 见图 3. VCUUV 仿黄鳍金枪鱼建造, 长 8 英尺 (约 2.44 m), 重 300 磅. 其目的在于开发一种利用涡控制推进的自主水下机器人 (UUV), 并通过自由的游动显示良好的减阻性、提高的机动性、方向稳定性/深度保持能力和更高的加/减速性能. VCUUV 可用来完成海底勘探、排雷布雷和光缆铺设等任务.



(a) VCUUV 结构示意图



(b) 转弯行进中的 VCUUV

图 3 Draper 实验室推出的 VCUUV
Fig. 3 VCUUV developed by Draper Lab

除了 MIT 外, 1996 年, 美国新墨西哥大学 Methran Mojarad 研究小组将高分子电解质离子交换膜 (IEM) 镀在仿生鱼鳍的金属薄片上, 通过外加电场实现人造合成肌肉运动, 产生了类似鳗鱼的游动方式^[9,25]. 东北大学海洋科学中心用形状记忆合金和链杆结构开发了波动推进的机器鳗鱼^[26], 见图 4. 通过身体侧向的波动, 机器鳗鱼不仅能驱动自身穿越水柱, 而且能控制其浮游深度. 如果将多机器鳗鱼构建成一多智能体系统 (MAS, multiple agent system), 可以用于潮汐区和江河的科学考察. 1999 年, 德州农工大学 (Texas A & M University) 宇航工程系应用 SMA 驱动技术开发了一种带脊柱的水下仿生潜器^[27]. 基于二维波动板理论, SMA 驱动单元不仅可以实现水翼的力和力矩控制, 而且能够产生向前的推进力.



图 4 东北大学研制的机器鳗鱼
Fig. 4 Undulatory lamprey developed by northeastern university

在日本, 90 年代初, 名古屋大学 Toshio Fukuda 教授开始了微型仿鱼水下推进器的研究, 他先后研制出采用形状记忆合金驱动的微型身体波动式水下推进器^[28]和压电陶瓷驱动

的双鳍鱼型微机器人^[29]. 在微型身体波动式水下推进器中, T. Fukuda 提出了一种波形合成产生驱动力的方法. 所提出的 SMA 驱动器由几种模态的 SMA 构成, 根据 SMA 激励方式的不同, 通过波形合成产生多种形状来模拟鳗目鱼类的身体波动, 产生推进力, 从而实现机器人的水下浮游. 1995 年, 东海大学的 Kato 实验室开发了研究人工胸鳍机动性和推进的测试平台——仿黑色鲈鱼机器鱼 (Blackbass)^[4,6], 见图 5. 1998 年, Shuoxiang Guo 和 Toshio Fukuda 等人研制了一种以离子交换聚合薄膜 (ICPF) 作为尾鳍驱动元件的微机器鱼样机^[30].

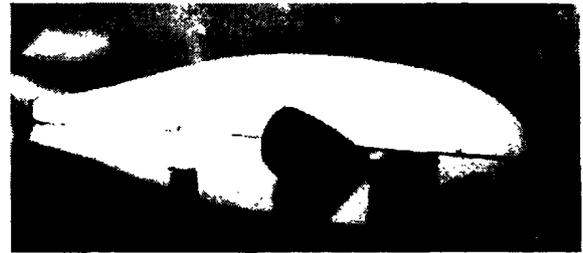


图 5 Kato 实验室研制的机器鱼黑鲈 (Blackbass)
Fig. 5 Blackbass robot developed by Kato Lab

为了研究最优推进方法, 开发高推进性能的智能型水下机器人, 从 1999 年开始, 运输省船舶技术研究所 (SRI) 开始了一系列的实验机器鱼项目研究^[31]. 其中, PF-300 用来研究转弯性能; PF-600 用来研究推进效率; S-FPSE2000 (2000 年 9 月研制) 用来研究半自由活塞型斯特灵发动机的推进效率, 半自由活塞型斯特灵发动机是 SRI 研制的一种新型发动机, 该发动机的输出可直接用于机器鱼的尾鳍摆动, 而不需要使用调速齿轮机构; PF-700 主要用于获取更高的推进速度; 而 UPF-2001 旨在研究机器鱼的高性能和多用途, 图 6 给出了游动速度测试中的 UPF-2001 (2002 年 1 月). 在 UPF-2001 的基础上, 最新研制的 PPF-09 已具有三维运动的功能, 即能实现上升下潜 (2002 年 9 月).



图 6 游动速度测试中的 UPF-2001
Fig. 6 UPF-2001 in swimming velocity test

3.2 国内研究现状 (Domestic research situation)

在鱼类推进机理研究和仿生机器鱼研制方面, 国内起步较晚. 80 年代中后期, 中国科技大学的童秉纲和程健宇博士采用半解析-半数值的方法, 提出了三维波动板理论 (3DWPT), 得到了国际上鱼类生物力学研究群体的广为运用和认同^[1,32]; 1994 年华中理工大学开展了柔性尾鳍推进装置的实验与理论研究, 初步探讨了尾鳍参数与推进效率之间的

关系;哈尔滨工程大学在国防基金的支持下开展了仿生机器章鱼的研究,其主要目的是用于辅助打捞沉船,近期他们又研制了一条仿生金枪鱼;哈尔滨工业大学在国家自然科学基金的支持下开展了水下机器人仿鱼鳍推进机理的研究,建立了利用弹性元件提高驱动效率的实验平台;中科院沈阳自动化研究所制作了两关节的仿生机器鱼模型.北京航空航天大学机器人研究所深入开展了仿鱼机器人(潜水器)技术的研究,提出了“波动推进理论”及其分析方法,设计研制了游动速度为 0.6 m/s 的仿生“机器鳗鱼”实验模型;2001 年 3 月又研制了仿生“机器海豚”,并在北京航空航天大学水洞实验室内进行了速度功率参数测定实验、鱼体流动显示实验和鱼体运动阻力测定实验,获取了鱼的摆动推进深层次机理;2001 年中科院自动化所复杂系统与智能科学实验室和北航机器人所联合开展“多微小型仿生机器鱼群体协作与控制的研究”,旨在为未来复杂、动态水下环境中多仿生机器人系统控制和协调作业提供理论基础和技术支持.图 7 给出了一机器鱼在有障碍物的水环境下戏球的场景,该机器鱼采用身体波动的推进模式,靠尾部的四个直流伺服电机来拟合鱼的游动,通过对机器鱼尾部电机的协调控制,机器鱼能规避障碍并自动跟踪漂浮的小球.

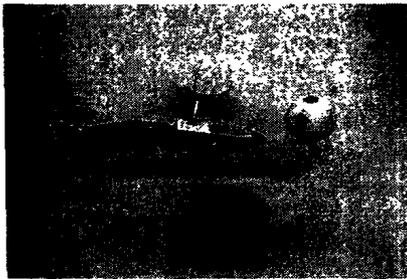


图 7 机器鱼水中戏球(2002.10)
Fig. 7 A robot fish playing ball in water

4 仿生机器鱼的主要研究内容(Main research content of robot fish)

受自然界鱼类推进的快速性和高效性启发,机器鱼研究已成为水下推进技术研究的热点,从 1990 年至今,人们已提出了各式各样的仿生机器鱼设计,并开始了仿生机器鱼样机的研制.机器鱼研究是一种多学科交叉的研究领域,由于水动力学和运动学模型尚不完善,可供借鉴的研发经验比较少.从近期来看,机器鱼研究要解决的具体问题应包括以下内容:

1) 鱼类推进理论模型的研究.鱼类推进运动学模型和水动力学模型的建立是仿鱼推进器设计的基础,流体力学家提出的鱼类波状游动的流体力学模型计算量大、过于繁琐,很难应用于实际设计中.从现有的文献来看,完善的、适于控制的水动力学的模型尚未建立.

2) 仿生机器鱼机械结构的探索.在鱼类的进化过程中,不同的环境进化出不同外形和种类的鱼;在机器鱼的设计过程中,如何选择合适的材料和动力、结合鱼类的推进机制来实现机器鱼的机构最优、推进效率最高已成为机器鱼研制的

关键.

3) 研究仿生机器鱼游动的推进速度—运动方程—效率—功率等方面的客观规律,突破机器鱼在水中高效运动所需的关键技术.

4) 仿生机器鱼的控制性能研究.对于机器鱼运动过程中的推进和稳定性的矛盾,作者认为应当遵循“稳定第一,控制第二,推进第三”的原则.合理、有效的控制是联结稳定性和快速性的桥梁.从现有的文献来看,对仿鱼水下推进器和多机器鱼协作的控制研究较少^[5,33,34],在文献[5]中,D. Barrett 等人基于遗传算法开发了一个自优化的机器鱼控制器,该控制器有效地应用了进化原理来优化机器鱼的游动性能;在文献[33]中,Kristi A. Morgansen 等人考虑了机器鱼的运动控制算法设计,应用非线性控制方法对一种平面的仿鳗科推进的机器鱼进行了建模和控制设计;在文献[34]中,Daisuke Iijima 等人建立了一个分布式自主的游动机器人系统,并利用改进的 Q 学习算法对该系统进行了避障研究.从控制的角度来看,对装备有各种传感器的机器鱼的控制性能研究应包括:

a) 定位与导航技术研究.无论是单条机器鱼还是多机器鱼系统,一旦步入应用阶段,定位与导航将是一个难题.利用视觉导航或 GPS(global positioning systems)导航或许是一种有效的方法,但在部分未知或完全未知环境下,如何快速、准确识别环境和目标将是制约机器鱼快速性、机动性发挥的关键,也是下一步研究的主要目标;

b) 游动控制算法的研究.游动控制包括速度控制和方向控制.参照鱼类推进的理论模型,在水动力学研究和实验的基础上进行机器鱼智能控制算法研究,可增加机器鱼的可控性和机动性;

c) 多机器鱼的协调协作研究.按照多智能体理论,开展多机器鱼协调游动的水动力学模型、多机器鱼协调运动、队形控制等一系列关键技术的研究,可为未来实用型机器鱼的群体协作提供必要的理论和技术支持.

此外,从航运的角度来看,仿鱼推进方式要想取代传统推进方式就不得不考虑舒适度的问题;如何进行鱼体头部和推进方向的协调控制,如何在尾部波动/摆动方式下保持整体的平稳度,在现有的文献中均未见报导.

5 结论(Conclusion)

目前,仿生机器鱼研究已经取得了许多可喜的进展,研究成果令人鼓舞,但还远未达到实用要求.尽管如此,机器鱼推进的快速、高效和低噪性已初见端倪,如 VCUUV 在摆动频率为 1 Hz 时,速度为 2.4 节(约 4.44 km/h),最大续航时间为 3 h,最小转弯半径为 1 倍体长(而 UUV 的最小转弯半径为 7 倍体长)^[24].随着流体力学、材料学、传感技术和控制技术的发展,根据 MAS 理论开发具有不同性能的智能机器鱼,将大大加快机器鱼在军事、航运和娱乐领域的应用.

总之,作为生物科学和工程技术科学的结合点,机器鱼的研制、开发涉及的面广,不仅需要新概念、新理论的指引,而且需要新材料和新工艺的应用.对机器鱼控制性能的研究

究,将加快机器鱼的应用步伐.相信,机器鱼的研究将朝着更深、更广的方向发展直至走入人们的生活.

参考文献(References):

- [1] 童秉钢. 鱼类波状游动的推进机制[J]. 力学与实践, 2000, 22(3): 69-74.
(TONG B G. Propulsive mechanism of fish's undulatory motion [J]. *Mechanics in Engineering*, 2000, 22(3): 69-74.)
- [2] SFAKIOTAKIS M, LANE D M, DAVIES J B C. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion [J]. *IEEE J of Oceanic Engineering*, 1999, 24(2): 237-252.
- [3] ANDERSON J M, KERREBROCK P A. The vorticity control unmanned undersea vehicle(VCUUV)—an autonomous vehicle employing fish swimming propulsion and maneuvering [A]. *Proc of 10th Int Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology* [C]. [s.l.]: [s.n.], 1997: 189-195.
- [4] KATO N, INABA T. Hovering performance of fish robot with apparatus of pectoral fin motion [A]. *Proc of 10th Int Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology* [C]. [s.l.]: [s.n.], 1997: 177-188.
- [5] BARRETT D, GROSENBAUGH M, TRIANTAFYLLOU M. The optimal control of a flexible hull robotic undersea vehicle propelled by an oscillating foil [A]. *Proc 1996 IEEE AUV Symposium* [C]. New York: IEEE Press, 1996: 1-9.
- [6] KATO N, FURUSHIMA M. Pectoral fin model for maneuver of underwater vehicles [A]. *Proc 1996 IEEE AUV Symposium* [C]. New York: IEEE Press, 1996: 49-56.
- [7] YAMAMOTO I, TERADA Y, NAGAMATU T, et al. Propulsion system with flexible/rigid oscillating fin [J]. *IEEE J of Oceanic Engineering*, 1995, 20(1): 23-30.
- [8] HIRATA K. Development of experimental fish robot [A]. *Proc of 6th Int Symposium on Marine Engineering* [C]. [s.l.]: [s.n.], 2000: 711-714.
- [9] MOJARRAD M, SHAHINPOOR M. Noiseless propulsion for swimming robotic structures using polyelectrolyte ion-exchange membrane [A]. *Proc SPIE 1996 North American Conf on Smart Structures and Materials* [C]. [s.l.]: [s.n.], 1996: 183-192.
- [10] TRIANTAFYLLOU M S, TRIANTAFYLLOU G S. An efficient swimming machine [J]. *Scientific American*, 1995, 272(3): 64-70.
- [11] 杨亲民. 智能材料的研究与开发[J]. 功能材料, 1999, 30(6): 575-581.
(YANG Q M. The research and development of smart material [J]. *Smart Material*, 1999, 30(6): 575-581.)
- [12] 蒋新松. 未来机器人技术发展方向探讨[A]. 迈向新世纪的中国机器人—国家 863 计划智能机器人主题回顾与展望[C]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2001: 199-206.
(JIANG X S. Discussion on future robotics technology [A]. *Chinese Robot Walking to New Century—Review and Prospect of Chinese High Technology Projects (863 Program)* [C]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2001: 199-206.)
- [13] KUMPH J M. The MIT robot pike project [EB/OL]. 1998, Accessed on 18 April 2003, Available: <http://web.mit.edu.towtank/www/pike/>.
- [14] KAHNEY L. Robofish act like real thing [EB/OL]. 2001, Accessed on 18 April 2003, Available: <http://www.wired.com/news/gizmos/0,1452,43317,00.html>.
- [15] MENZEL P, ALUISIO F D. *Robo Sapiens, Evolution of a New Species* [M]. [s.l.]: Arts & Licensing Int, Inc, 2002: 80-81.
- [16] BREDER C M. The locomotion of fishes [J]. *Zoologica*, 1926, 4(2): 159-296.
- [17] WEBB P W. Form and function in fish swimming [J]. *Scientific American*, 1984, 251(1): 58-68.
- [18] 谭湘强, 钟映春, 杨宜民. 液体中泳动微机器人的现状与分析[J]. 机器人, 2001, 23(5): 467-470.
(TAN X Q, ZHONG Y C, YANG Y M. Study and analysis of current situation towards swimming microrobot in liquid [J]. *Robot*, 2001, 23(5): 467-470.)
- [19] HIRATA K. A semi free piston stirling engine for a fish robot [A]. *Proc of 10th Int Stirling Engine Conf* [C]. [s.l.]: [s.n.], 2001: 146-151.
- [20] GRAY J. Studies in animal locomotion VI—The propulsive powers of the dolphin [J]. *J of Experimental Biology*, 1936, 13(5): 192-199.
- [21] TRIANTAFYLLOU M S, TRIANTAFYLLOU G S, YUE D K P. Hydrodynamics of fishlike swimming [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2000, 32(1): 33-53.
- [22] DRUCKER E G, LAUDER G V. Locomotor function of the dorsal fin in teleost fishes: Experimental analysis of wake forces in sunfish [J]. *J of Experimental Biology*, 2001, 204(17): 2943-2958.
- [23] DRUCKER E G, LAUDER G V. Locomotor forces on a swimming fish: three-dimensional vortex wake dynamics quantified using digital particle image velocimetry [J]. *J of Experimental Biology*, 1999, 202(18): 2393-2412.
- [24] ANDERSON J M, KERREBROCK K. The vorticity control unmanned undersea vehicle(VCUUV) performance results [A]. *Proc of 11th Int Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology* [C]. [s.l.]: [s.n.], 1999: 360-369.
- [25] MOJARRAD M, SHAHINPOOR M. Biomimetic robotic propulsion using polymeric artificial muscles [A]. *Proc 1997 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. New York: IEEE Press, 1997: 2152-2157.
- [26] AYERS J, DAVIS J, RUDOLPH A. *Neurotechnology for Biomimetic Robots* [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 2002.
- [27] REDINIOTIS O, LAGOUDAS D, GARNER L, et al. Development of a shape memory alloy actuated underwater biomimetic vehicle [J]. *J of Smart Materials and Structures*, 1999, 9(5): 673-683.
- [28] FUKUDA T, HOSOKAI H, KIKUCHI I. Distributed type of actuators of shape memory alloy and its application to underwater mobile robotic mechanisms [A]. *Proc 1990 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. New York: IEEE Press, 1990: 1316-1321.
- [29] FUKUDA T, KAWAMOTO A, ARAI F, et al. Mechanism and swimming experiment of micro mobile robot in water [A]. *Proc*

1994 *IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. New York: IEEE Press, 1994: 814 - 819.

[30] GUO S X, FUKUDA T, KATO N, et al. Development of underwater microrobot using ICPF actuator [A]. *Proc 1998 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. New York: IEEE Press, 1998: 1829 - 1834.

[31] HIRATA T. Welcome to fish robot home page [EB/OL]. 2000, Accessed on 18 April 2003, Available: <http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/fish/>.

[32] 童秉纲, 庄礼贤. 描述鱼类波状游动的流体力学模型及其应用 [J]. 自然杂志, 1998, 20(1): 1 - 7. (TONG B G, ZHUANG L X. Hydrodynamic model for fish's undulatory motion and its application [J]. *Natural J*, 1998, 20(1): 1 - 7.)

[33] MORGANSEN K A, DUINDAM V, MASON R J, et al. Nonlinear control methods for planar carangiform robot fish locomotion [A]. *Proc 2001 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. New

York: IEEE Press, 2001: 427 - 434.

[34] IIJIMA D, YU W, YOKOI H, et al. Obstacle avoidance learning for a multi-agent linked robot in the real world [A]. *Proc 2001 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. New York: IEEE Press, 2001: 523 - 528.

作者简介:

喻俊志 (1975 —), 男, 中科院自动化所博士研究生. 主要研究方向为多机器人系统, 机器鱼控制. E-mail: jzyu@compsys.ia.ac.cn;

陈尔奎 (1970 —), 男, 中国矿业大学信电学院博士研究生, 高工. 主要研究方向为智能控制, 移动机器人. E-mail: cek_chen@sohu.com;

王 硕 (1973 —), 男, 中科院自动化所助理研究员. 主要研究方向为多机器人系统, 机器鱼控制. E-mail: swang@compsys.ia.ac.cn;

谭 民 (1962 —), 男, 中科院自动化所研究员, 博士生导师. 主要研究方向为先进制造系统, 多机器人系统, 机器人控制, 智能机器人. E-mail: tan@compsys.ia.ac.cn.

下 期 要 目

带有输出传输时延的网络化控制系统基于观测器的 FDI 设计..... 郑 英, 方华京, 王 华, 李 力

基于混合遗传模拟退火算法的矢量场机器人导航 邹细勇, 诸 静

区间线性脉冲系统的鲁棒耗散性及其反馈镇定 刘 斌, 刘新芝, 廖晓昕

嵌有 Kelvin-Voigt 阻尼片的非均质梁的镇定 陈叔平, 司守奎

带动态边界的非均匀 Timoshenko 梁的反馈镇定 阎庆旭, 冯德兴

一类受控 Petri 网的控制器设计 董利达, 吴维敏, 徐巍华, 苏宏业, 褚 健

具有域极点配置的混合 H_2/H_∞ 滤波 杨富文

基于未知控制增益的非线性系统自适应迭代反馈控制 陈华东, 蒋 平

基于几何方法的约束线性系统控制快速算法 张 娟, 陈 杰

单关节转动智能材料臂的分布式鲁棒控制器设计 龚剑琴, 葛树志, 万百五

两种求解机械手最短时间动作路径规划的新算法及其在基于 PVR 技术的控制平台上的实现
..... 罗 熊, 樊晓平

基于耗散性的非线性系统的自适应神经网络控制 牛玉刚, 王行愚

不确定性机器人系统自适应鲁棒迭代学习控制 杨胜跃, 樊晓平, 罗 安

燃烧控制中温度设定的优化..... 张 斌, 王景成, 徐立云, 张健民

自适应信息融合算法研究与应用 崔平远, 黄晓瑞, 崔祜涛