

仿生机器鱼

原理及应用

沈艳 郭兵 章洁/著

*The principle and application of
biomimetic robotic fish*



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

内容简介

仿生机器鱼原理及应用

沈 艳 郭 兵 章 洁 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

鱼类以其快速、高效、灵活的运动方式吸引着国内外的研究者探索其运动机理,从而为设计仿生机器鱼及其应用提供理论基础。本书详细介绍了鱼类的运动机理,探究了机器鱼的运动学、动力学模型以及能耗模型。在此基础上,设计了单关节机器鱼,包括机械和控制系统的软硬件设计。同时,对机器鱼的控制策略以及协调协作技术进行了阐述。全书分为六章。第1章介绍了仿生机器鱼的研究背景和意义,概述了仿生机器鱼的研究内容与发展现状。第2章描述了鱼类的游动机理,为建立机器鱼动态模型提供仿生基础。第3章分析了仿生机器鱼的运动、受力以及力矩情况,建立了仿生机器鱼的运动学以及动力学模型。同时,为进一步延长机器鱼的寿命,建立了机器鱼能耗模型。仿生机器鱼的动态建模为进一步设计、优化以及机器鱼的应用奠定理论基础。第4章给出了机器鱼的一种典型的硬件以及软件设计。第5章研究了机器鱼的运动控制策略。第6章探讨了多机器鱼协调与协作技术等内容。

本书面向高等院校自动化、机械工程、测控、计算机、电子工程等专业高年级本科生、研究生和教师,可作为有志从事水下仿生机器鱼研究人员的科研与教学参考书,同时,亦可作为从事水下机器人研究、设计与应用的工程人员的参考书,共同推动水下机器人的发展。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

仿生机器鱼原理及应用 / 沈艳, 郭兵, 章洁著. —北京: 电子工业出版社, 2017.2
ISBN 978-7-121-30381-4

I. ①仿… II. ①沈… ②郭… ③章… III. ①仿生机器人—海洋机器人—研究 IV. ①TP242

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第276358号

策划编辑: 赵玉山

责任编辑: 赵玉山

印 刷: 三河市华成印务有限公司

装 订: 三河市华成印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本: 720×1 000 1/16 印张: 12.25 字数: 239 千字

版 次: 2017年2月第1版

印 次: 2017年2月第1次印刷

定 价: 59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254556, zhaoyz@phei.com.cn。

前言

随着人类社会的急速发展, 占地球大部分表面积的海洋自身蕴含着丰富的食物、矿产等资源促使人类不断探索和开发海洋。为了充分利用海洋资源, 各种船只、潜水艇及水下机器人等被广泛地使用和设计, 虽然这些水上及水下作业的机器已经拓展了人类的生存空间, 但是其效率较低的特点也迫使人类不断探索新的水下推进技术。鱼类以其卓越的游动能力和机动性给人类提高水下机器人系统的推进操控性能及与水环境的交互性能带来了希望。鱼类的高速、高效游动, 吸引着学者们研究鱼类的推进机理, 并利用所研究的推进机理研制一些水下仿生学机器人, 并希望在实际的船只、潜艇等水上水下作业的器械上加以利用, 以提高其机动性和效率。

本书旨在汇集作者和其他学者近年来的研究成果, 反映国内外机器鱼研究和应用的最新进展, 以期推动水下仿生机器鱼的研究和发展。在本书的编写和机器鱼研究与开发过程中, 得到众多国内外专家的亲切关怀和广大读者的热情支持与帮助。美国密歇根州立大学的 Xiaobo Tan 教授、Guoliang Xing 教授、Jianxun Wang 博士、Hong Lei 博士、Yu Wang 博士, 香港理工大学的邵子立副教授, 澳大利亚 La Trobe 大学的王殿辉教授, 哈尔滨工业大学陈松林教授等, 给予了作者大力支持和悉心指导, 电子工业出版社的有关领导和赵玉山老师为本书的出版付出了辛勤劳动, 借此向他们表示最诚挚的谢意。

最后, 特别感谢国家自然科学基金项目“机器鱼传感网络的低功耗协作调度关键技术研究(No.61472050)”、四川省应用基础研究计划“机器鱼物联网能量感知协调控制研究(No.2014JY0257)”、国家自然科学基金重点项目“嵌入式系统的低功耗软件设计方法与技术研究(No.61332001)”、国家自然科学基金项目“智能移动嵌入式系统的协同节能关键技术研究(No. 61272104)”、四川省科技计划项目“基于自主可控 RFID 的物联网关键技术研发及应用(No. 2015GZ0103)”以及成都市科技惠民技术研发项目“低功耗的嵌入式操作系统及中间件技术研究(No. 2014-HM01-00326-SF)”等项目对本项研究的资助与支持。

本书由沈艳、郭兵、章洁等执笔完成, 参与本书编写工作的还有许启新、司豪、薛静静、张榕等。仿生机器鱼的研究仍处于快速发展时期, 作者对许多问题仍未深入研究, 一些有价值的新内容也来不及收入本书。由于作者知识和水平有限, 加上编写时间较紧, 书中错误之处在所难免, 希望各位专家和读者批评指正。

沈艳

2016年8月

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 仿生机器鱼研究的背景	(1)
1.2 仿生机器鱼的发展与现状	(4)
1.2.1 仿生机器鱼系统研制	(5)
1.2.2 仿生机器鱼推进机理研究	(11)
1.2.3 仿生机器鱼控制方法研究	(12)
1.2.4 多仿生机器鱼协调与协作研究	(13)
1.3 仿生机器鱼的研究内容	(14)
1.4 本书的主要工作及组织结构	(16)
1.5 小结	(17)
参考文献	(17)
第2章 鱼类游动机理	(23)
2.1 引言	(23)
2.2 鱼类鱼鳍描述	(24)
2.3 鱼类推进模式	(25)
2.4 鲹科模式推进机理	(27)
2.5 小结	(29)
参考文献	(29)
第3章 仿生机器鱼动态建模	(31)
3.1 引言	(31)
3.2 仿生机器鱼运动学模型	(31)
3.2.1 尾鳍的运动学模型	(31)
3.2.2 机器鱼运动学模型	(32)
3.3 仿生机器鱼动力学建模	(35)
3.3.1 仿生机器鱼受力分析	(35)
3.3.2 仿生机器鱼动力学模型	(36)
3.3.3 仿真及实验验证	(42)
3.4 仿生机器鱼能耗建模	(49)
3.4.1 仿生机器鱼能耗分析	(49)

3.4.2	能耗测量主要技术手段	(50)
3.4.3	仿生机器鱼能耗模型	(53)
3.5	小结	(64)
	参考文献	(65)
第4章	仿生机器鱼机总体设计	(68)
4.1	引言	(68)
4.2	仿生机器鱼总体方案设计	(68)
4.3	仿生机器鱼机械结构设计	(70)
4.3.1	现有机器鱼机构比较和分析	(70)
4.3.2	机器鱼鱼体设计	(72)
4.3.3	机器鱼尾鳍设计	(73)
4.3.4	机器鱼重心调节	(74)
4.3.5	机器鱼制作	(75)
4.4	仿生机器鱼硬件设计	(77)
4.4.1	主控制模块	(79)
4.4.2	运动模块	(82)
4.4.3	感知模块	(86)
4.4.4	无线通信模块	(87)
4.4.5	供电模块	(88)
4.5	仿生机器鱼软件设计	(91)
4.5.1	机器鱼软件设计	(91)
4.5.2	上位机软件设计	(106)
4.6	机器鱼的典型应用	(109)
4.6.1	机器鱼在水环境监测中的应用	(109)
4.6.2	盐湖环境的多机器鱼应用	(116)
4.7	小结	(117)
	参考文献	(117)
第5章	仿生机器鱼运动控制策略	(122)
5.1	引言	(122)
5.2	仿生机器鱼的基本运动控制方法	(123)
5.2.1	速度控制方法	(123)
5.2.2	游动方向控制方法	(124)
5.2.3	点到点控制方法	(124)

5.3 仿生机器鱼的运动控制方法	(125)
5.3.1 基于PID的控制方法	(125)
5.3.2 基于模糊的控制方法	(128)
5.3.3 基于智能算法的控制方法	(132)
5.3.4 基于能量考虑运动控制方法	(136)
5.4 小结	(140)
参考文献	(140)
第6章 多机器鱼协调与协作技术	(144)
6.1 引言	(144)
6.2 机器鱼节点模型	(145)
6.2.1 感知模型	(145)
6.2.2 通信模型	(148)
6.2.3 运动模型	(149)
6.3 多仿生机器鱼能量有效的任务分配	(149)
6.3.1 粒子群优化算法	(150)
6.3.2 任务分配数学描述	(153)
6.3.3 仿真实验	(155)
6.4 基于Bezier曲线的多仿生机器鱼路径跟踪	(158)
6.4.1 Bezier 曲线	(158)
6.4.2 Bezier 曲线路径跟踪	(159)
6.4.3 实验结果与分析	(161)
6.5 基于虚拟力的多机器鱼群避碰避障	(162)
6.5.1 人工势场法	(162)
6.5.2 机器鱼虚拟力分析	(162)
6.5.3 仿真实验	(165)
6.6 多机器鱼能量有效的目标跟踪	(168)
6.6.1 目标运动模型	(168)
6.6.2 测量模型	(169)
6.6.3 机器鱼调度算法设计	(169)
6.6.4 仿真实验	(171)
6.7 多机器鱼编队控制	(175)
6.7.1 队形控制	(175)
6.7.2 任务描述	(178)

(151)	6.7.3 一致性编队算法	(181)
(152)	6.7.4 仿真与实验	(181)
(153)	6.8 小结	(183)
(154)	参考文献	(184)

第1章 绪 论

1.1 仿生机器鱼研究的背景

随着陆地资源日益减少和枯竭,人们把目光投向了占据地球 71%的面积且蕴藏丰富资源和巨大开发价值的海洋和河流。海洋和河流不仅是孕育生命的摇篮,存储资源的宝库,也是交通运输的要道。根据联合国“21 世纪议程”,海洋和河流不仅是全球生命支持系统的基本组成部分,也是一种有助于实现可持续发展的宝贵财富。因此,随着海洋和河流逐渐成为人类未来发展的新领域,一场以开发海洋和河流资源为标志的“蓝色革命”正在世界范围内兴起。例如,各国通过在海底铺设输油、输气管道开采海洋石油和天然气,目前世界海底管道铺设的水深已达 2150 米。

然而,人们在探索和利用水资源的同时,不可避免地对其造成很大的破坏。工业污染源、农业污染源和生活污染源对水环境的污染日益严重,出现了水域富营养化严重、重金属元素超标等严重问题,特别是近年来海域漏油事件造成了严重的生态灾难,如 2010 年 4 月, Mexico 海湾外海油污外漏事件严重影响海洋多种生物以及当地的渔业和旅游业, 2011 年中国蓬莱 19-3 油田溢油事故和 2010 年大连新港“7·16”油污事件对邻近海域生态环境造成污染。中国国家海洋局发布的《2012 年中国海洋环境状况公报》中指出:我国近岸海域水体污染、生态受损、灾害多发环境问题依然突出。因此,水资源的实时检测技术已经提上了环境保护科学的日程安排,例如,水中污染物质的浓度大小与分布区域是随着时间、地点、气象条件及污染源排放情况等诸多因素实时变化的,定时定点进行人工采样所获得的测量结果不能准确反映污染物的动态变化情况,难以及时提供污染现状并预测发展趋势。为了及时获得污染物在水中动态变化的准确信息,正确分析水质污染状况,更好地研究污染物扩散、转移和转化规律,人们迫切需要一种实时智能自动检测湖泊或河流水质污染的技术。该技术既能省去繁琐的人力物力,又能增强水质污染检测技术的智能性与可靠性。

另一方面,水环境的恶劣性、复杂性、高度的腐蚀性、强压力和对传感器的不透明性使得水环境下的作业任务发生了很大变化,一般的潜水技术已无法适应

水下现代高深度综合考察、研究以及完成各种作业和应用的需要。这促进了用于水环境下的机器人、航潜器以及传感器网络的研究和发展^[1,2]。

当前，用于水环境下的航潜器种类较多，主要分为四类：拖拽式潜水器、遥控式水下航潜器(ROV: Remotely Operated Vehicle)、无人无缆水下航潜器(UUV: Unmanned Underwater Vehicle)、自主式水下航潜器(AUV: Autonomous Underwater Vehicle)。

拖曳式潜水器一般被拖在母船后面，其表面安装有各种传感器。拖曳式潜水器主要用于军事和科学研究，主要用于观察识别定位、搜索、细致测绘、水质分析、放射性测量等。

第一个遥控式水下机器人于 1953 年研制成功。20 世纪 70 年代后，由于海洋工程和近海石油开发的需要，遥控式水下机器人得以迅速发展，目前已发展到上千艘，较著名的有 Apparat、Skat Geo、Robbin 等，典型的遥控式水下机器人如图 1.1 所示。

无人无缆水下航潜器是一种以潜艇或水面舰船为支援平台，可长时间在水下自主远程航行的、可以回收的无人智能小型武器装备平台。无人无缆水下航潜器主要用于水下侦察、遥控猎雷和作战等。

自主式水下航潜器又称为智能水下机器人，它是伴随着计算机技术、通信技术、人工智能的发展而出现的新型智能化的水下机器人，如图 1.2 所示。作为探索海洋和河流的主要工具，因其活动范围大、智能水平高、作业费用低等特点，在民用和军事领域有着广泛的应用^[3]。例如，加拿大耗时 5 年时间开发的 Theseus AUV，用于铺设北冰洋中冰层覆盖下的海底光缆以及远程调查等；英国于 1995 年开发了一部用于海洋科学研究的 AUTOSUB-1 AUV。

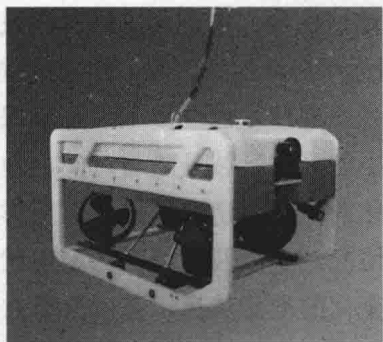


图 1.1 遥控式水下机器人 (SYSROV T300)

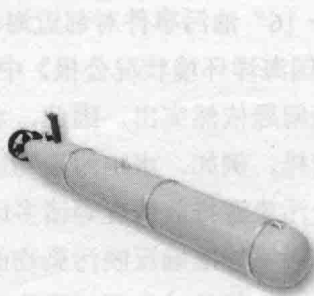


图 1.2 自主式水下航行器

由于 AUV 以电磁马达或液压马达作为原动机，采用螺旋桨和叶轮等原理制造，存在体积大、质量重、推进效率低、瞬时响应严重滞后、能耗大、噪声大、加速性能弱、运动灵活性差以及对环境扰动大等缺点，极大地限制了其在狭窄、

复杂和动态环境中的应用。因此,研究人员力求寻找一种具有结构简单、高效率、高机动性、低扰动的运动特点和对复杂生存环境的高度适应性等特点的新型水下航行器,以适应海洋和河流开发与探索以及水环境监控的需求。

近年来,随着仿生学、人工智能的不断进步以及机器人技术的发展,仿生机器鱼(Biomimetic Robotic Fish)的研究成为鱼类推进机理和机器人技术的结合点。所谓仿生机器鱼是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(Smart Material)实现水下推进的一种运动装置^[4]。由于机器鱼研究以鱼类的解剖学结构及其游动技能为基础,这使得机器鱼的运动更符合流体力学原理,具有更好的加速和转向能力。因此,与传统的基于螺旋桨的水下航行器相比,机器鱼具有以下特点^[5]:

(1) 结构简单,仿生性能良好。机器鱼在外形以及游动方式上都与自然界中的鱼类相似,对海洋生态的影响较小。机器鱼实现桨舵功能的融合,精简了机构,不仅有利于实现水下机器人的小型化、微型化,而且降低了制造成本。

(2) 机动性能优异。机器鱼通过身体和鱼鳍的协调运动,可提高快速启动、上升、下潜、悬停定位以及机动转弯的性能,其转向半径为其身体长度的 10%~30%,增强了机器鱼在复杂水下环境中的作业能力。而螺旋桨推进方式下的舰艇在高速行驶时需要以 3~5 倍体长的转向半径缓慢回转。

(3) 推进效率高。当前螺旋桨船舶的推进总效率不超过 60%。采用仿生推进器,其推进效率可提高 30%以上,从而节省能源,延长水下作业时间,提高续航能力。

(4) 隐蔽性好。螺旋桨在高速旋转时会产生过多不需要的紊流、非定常的涡流和热量,并伴随大量的空泡噪音、扰动噪音。而采用仿生波动式或摆动式运动,其尾流与鱼类类似,对环境的扰动小,很难被水下声呐装置探测到,有利于隐身和突防。

(5) 方便信息传输。机器鱼的设计以模块组装为主,可以将各种传感器、摄像机及卫星跟踪系统插入主模块,及时向海上和陆地的控制中心发送水下信息资料,控制中心也可以利用卫星跟踪系统提供的数据,准确地判断出机器鱼的海底坐标,从而大大提高探测效率。

虽然仿生机器鱼推进器因鱼类推进理论尚不成熟,波动推进的技术实现手段不够高明,但仿生鱼以其上述优点,具有重要的研究价值和应用前景^[4,5,6,7]。

(1) 军事应用领域。目前装载在舰船和潜艇上的常规螺旋桨推进,其工作噪声大,对环境的扰动大,不利于隐蔽。针对军事应用对推进器的机动性和隐蔽性的较高要求,机器鱼体积小,续航能力强,而且运动形式酷似活鱼,其游动方式和运动时产生的低噪声,因此,机器鱼在执行远距离侦察任务时不容易被对方发

觉。同时,其高度的机动性使其自由进出复杂的管道、缝隙、洞穴,既可侦察,也可隐藏。在必要的时候,机器鱼可以携带爆破装置对重要的目标进行破坏,扫除前进道路或重要航道上的危险物品等。

(2) 水环境探险。在海洋探险中,对未知水域的探索存在一定的危险性,机器鱼作为先头部队预先对该区域进行探测,其能源利用率高,可以满足作业时间长,作业范围大的使用要求。

(3) 水生生物探索。螺旋桨水下推进对环境的扰动大,不仅不利于研究者接近和跟踪要研究的水生生物,还可能对其造成伤害,甚至造成死亡。机器鱼具有和鱼类相同的运动方式,容易接近水生生物,进行近距离观测,有效地记录其生活习性、自然状况、进食情况等信息,以便进行深入研究。

(4) 水下考古。水下考古作业是一项非常复杂的作业。由于自然环境的变迁、人类活动以及海洋、天气变化等诸多因素影响,许多见证历史的历史遗迹和沉船沉没于水底。这些历史遗迹和水下沉船的考察和打捞是相当困难的。机器鱼依靠高度的机动性可以容易地进出淹没于水下的建筑物、沉眠于水下的沉船,为考古、打捞人员提供水下情况的详细信息,便于他们研究与分析。

(5) 狭窄空间内的检测。对于复杂的、空间狭窄、空间结构复杂的场所,如管道检测,机器鱼可携带必要的检测设备,自由穿梭于复杂的管道中,代替工作人员进入需要检测的区域,完成检测,并将检测结果发送回来。

(6) 水资源监测。随着工业化进程的加快,水资源受到不同程度的污染,利用机器鱼替代人工进行水质监测,实时监测水环境的水质水平,有助于及时察觉水质变化,对水环境的保护具有重要意义。

(7) 娱乐领域。机器鱼可以设计成各种鱼类的形体,包括只能在深海中活动的鱼类,灭绝或即将灭绝的鱼类。通过对这些鱼类的仿生设计,可以在如水族馆、博物馆现场展示这类鱼的风采,丰富普通群众的视野。

鱼类经过长期的自然选择,进化出性能完备的游动机能和器官,为人类研制新型水下推进控制系统提供了模仿对象^[8]。随着流体力学、材料学、传感技术和控制技术的不断融合,机器鱼能够像鱼一样灵活地游动,机器鱼群像鱼群一样相互协作的愿望将会变为现实。

1.2 仿生机器鱼的发展与现状

当前,仿生机器鱼的研究受到各国越来越多的学者,尤其是发达国家(如美

国、日本和欧洲国家)的高度重视,在鱼类游动机理、驱动材料、推进技术、控制技术、能源供给和水下通讯技术等方面已开展了很多研究工作,希望能够实现集高效、灵活和隐形于一体的新型水下机器人。

1.2.1 仿生机器鱼系统研制

机器鱼的研究重点之一是从仿生的角度研制快速、高效、高机动性的机器鱼。美国麻省理工大学(MIT) David Barrett 等人在对金枪鱼的身体特征和游动形式长期研究的基础上,于1994年开发研制了世界上第一条仿生机器鱼 RoboTuna,如图1.3(a)所示。该机器鱼鱼体长约1.2m,采用6台大扭力直流伺服电机驱动控制各关节转角,骨架部分的设计不仅充分考虑到鱼体游动时的刚性和柔韧性要求,而且兼顾鱼整体曲线的平顺性。鱼皮采用高弹性的纤维表皮,极大地降低了水对鱼体的摩擦阻力,其最大游动速度可达2m/s,推进效率高达90%。1995年MIT又推出了改进版的 RoboTuna,名为 Pike,如图1.3(b)所示。1998年,该实验室成功研制出以黄鳍金枪鱼为设计原型的 VCUUV,如图1.3(c)所示。该机器鱼体长2.5m,身体完全由一整块柔软的聚合体材料制成,具有较强的防水性能。VCUUV 相对于之前的两代机器鱼具有更好的机动性和运动的稳定性^[9,10,11,12]。

2014年,美国海军在小溪-斯多利堡联合远征基地(JEBLC-FS)进行了“幽灵泳者”的水中测试,如图1.4所示。该机器的头部可安装声学传感器和水下摄像机等载荷,最快直游速度达40节(约74.08km/h)。

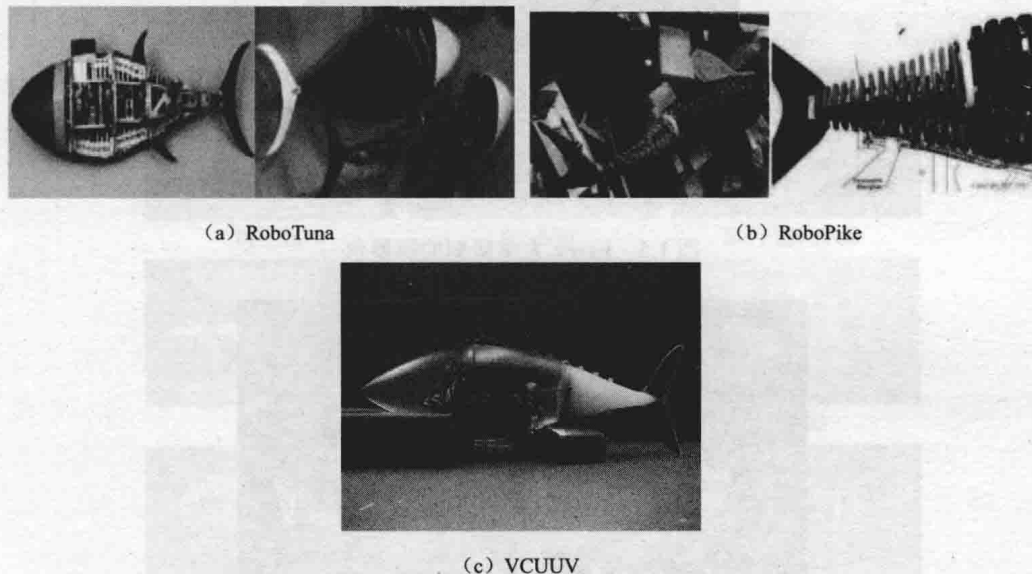


图1.3 MIT研制的仿生金枪鱼



图 1.4 幽灵泳者

英国 Essex 大学成功研制出身长 4.9 英尺、外形似宝石般且具有自主控制能力的机器鱼，如图 1.5 所示。该机器鱼曾在伦敦水族馆进行了展览。路透伦敦 2012 年 5 月报道，经过改进的 5 条类似的机器鱼被部署到西班牙北部港口希洪（Gijon）进行海洋测试，如图 1.6 所示。它们借助于更长的电池寿命以及更为先进的传感器，互相协调，对港口的海水进行采样，检测水质的污染状况，执行搜寻水中污染物的巡逻任务。它们一次能够执行大约 8 小时的探测任务，并无线传输勘测数据，帮助相关政府部门及时快速地追踪污染泄漏源或非法倾倒的污染物^[13]。

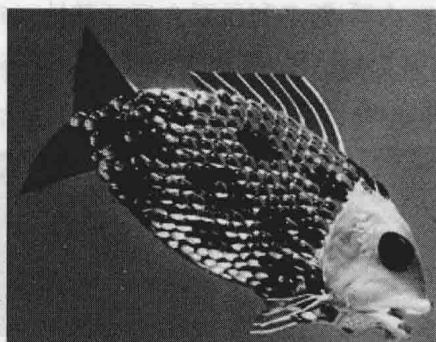


图 1.5 Essex 大学研制的机器鱼

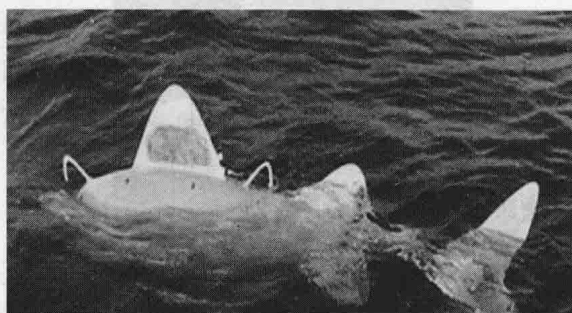


图 1.6 搜索污染水源所用的机器鱼

美国密歇根州立大学 Xiaobo Tan 领导的 SML (Smart Microsystem Lab, 智能微小系统实验室) 开发了各种类型的机器鱼^[14,15], 如图 1.7 所示。在此基础上, 将这些机器鱼组建成传感网络, 用于收集河流、海洋中有价值的信息, 这些数据将有助于人类对河流的清理^[16,17]。另一方面, 该实验室已开始开展机器鱼能耗问题的研究, 着手研究低能耗机器鱼。

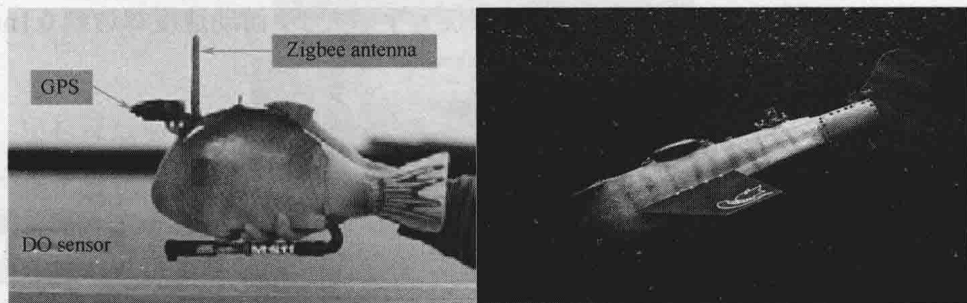


图 1.7 MSU 研制的机器鱼

日本对于仿生机器鱼的研究中添加了很多智能材料, 例如, 通过对智能伸缩材料或者记忆合金 (SMA, Shape Memory Alloy) 的控制使鱼体产生近似于肌肉牵制的摆动, 使其更接近于真鱼的波动。图 1.8 为日本运输省船舶技术研究所的 Koichi Hirata 教授的研究组研制出的机器鱼的样机。其中, UPF-2001 机器金枪鱼长约 0.97m, 最大速度约 0.97m/s。UPF-2001 是一个高性能机器鱼实验平台, 能根据不同的应用要求, 对鱼体进行变形调整, 如调长鱼体增加稳定性, 减少阻力, 提高巡航速度; 缩短鱼体则可提高转弯机动性^[18]。

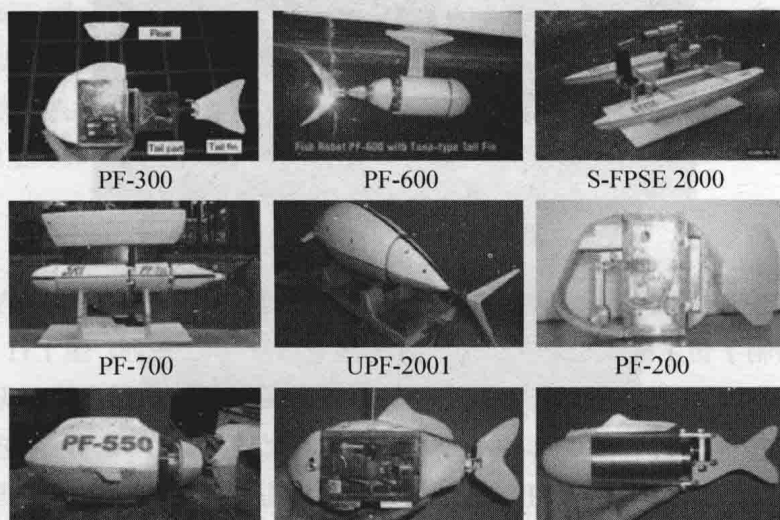


图 1.8 日本研制的机器鱼样机

1999 年, 日本三菱公司 (MHI) 研制出仿腔棘鱼类机器鱼 Mitsubishi Animatronics, 长约 0.7m, 重约 12kg, 游速 0.26m/s, 尾鳍部分由硅树脂橡胶制作而成。该机器鱼由外部计算机控制, 内部电池供电。同年, 东京工业大学研制出了具有两关节自推进的自主导航机器海豚, 与实际海豚大小类似, 长约 1.75m, 游速约 1.15m/s。2005 年, 日本大阪大学的 Endo.S 以硅胶材质制作了一双启动空腔推动的仿生机器鱼, 如图 1.9 所示, 其体积仅为手掌大小, 游动速度却达到 0.1m/s。

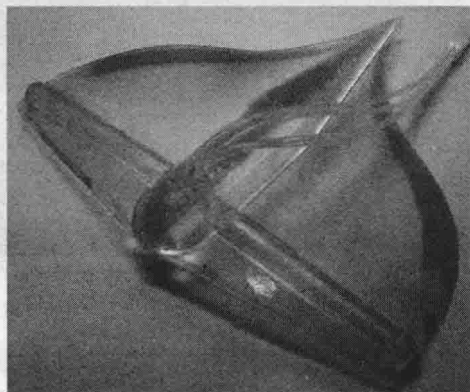


图 1.9 日本大阪大学研制的机器鱼

德国 Festo 公司于 2007 年研制出的胸鳍摆动仿生机器鱼 Aqua_ray, 如图 1.10 所示。该机器鱼长 615mm、翼展 960mm, 最大速度达 0.5m/s。

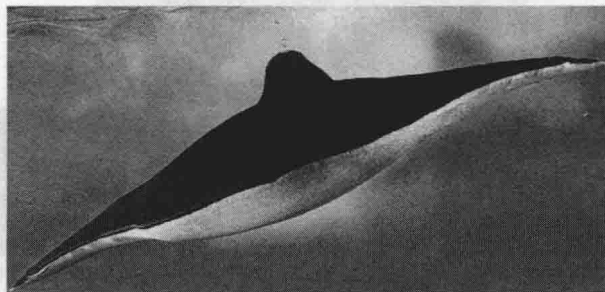


图 1.10 德国研制的机器鱼

北京航空航天大学对机器鱼的结构设计、控制以及运动机理等内容进行了研究, 先后研制了仿生鳗鲡机器鱼、仿海豚机器鱼以及 SPC 系列, 图 1.11 为 SPC 机器鱼。其中 SPC-II 仿生机器鱼由动力推进系统、图像采集和图像信号无线传输系统、计算机指挥控制平台 3 部分组成。它的最高时速可达 1.5m/s, 能够在水下连续工作 2~3 小时。2004 年, SPC 机器鱼辅助了考古专家对福建郑成功古战舰遗址进行水下探测^[19,20]。



图 1.11 北京航空航天大学研制的 SPC 机器鱼

中科院自动化所在对鱼类深入观察的基础上,开发了多种类型的微小型机器鱼以及多机器鱼协调控制系统,并对机器鱼的控制、感知能力以及协调控制方法开展了深入的研究。图 1.12 所示为该研究组的微小型仿生鱼越障实验。同时,课题组还针对以仿生机器鱼为传感器网络节点的传感网络系统进行了深入研究,为仿生机器鱼的广泛应用奠定了基础^[21]。



图 1.12 微小型机器鱼越障实验

哈尔滨工程大学研究组研制了“仿生-I”号机器鱼原理样机^[22],如图 1.13 所示,该鱼以蓝鳍金枪鱼为蓝本,配有月牙形尾鳍和一对联动胸鳍,体长 2.4m,由体内的伺服电机分别驱动胸鳍和尾鳍以得到摆动运动,其尾鳍摆动 1.33Hz 时,最高游速达 1.2m/s。

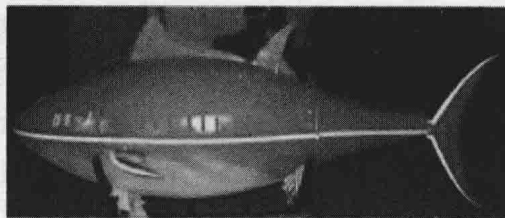


图 1.13 仿生-I 号机器鱼原理样机

哈尔滨工业大学成功研制了“HRF-I”号和“HRF-II”号机器鱼原理样机,并建立了实验平台,利用弹性部件来提高驱动效率。如图 1.14 所示,机器鱼游速可