



中国人工智能学会支持
人工智能科普丛书

王硕 谭民 编著

Robot Fish **机器鱼**



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

人工智能科普丛书

机 器 鱼

王 硕 谭 民 编著

北京邮电大学出版社

· 北 京 ·

本书部分工作得到了国家自然科学基金(No. 50475179)
和国家 973 计划(No. 2002CB312200)的支持

《机器鱼》从内部结构与外型设计、运动机理与控制方法、定位与导航、传感器系统到智能决策系统等方面对机器鱼的研究工作和结果进行了介绍,以使仿生机器人领域的爱好者和其他领域的学者对这一研究领域有进一步的了解。

图书在版编目(CIP)数据

机器鱼/王硕, 谭民编著. —北京: 北京邮电大学出版社, 2006
ISBN 7-5635-1261-6

I. 机... II. ①王... ②谭... III. 仿生机器人 IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 060180 号

书 名: 机器鱼

编 著: 王 硕 谭 民

责任编辑: 王晓丹

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(100876)

北方营销中心: 电话 010-62282185 传真 010-62283578

南方营销中心: 电话 010-62282902 传真 010-62282735

E - mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京源海印刷有限责任公司

开 本: 850 mm×1 168 mm 1/32

印 张: 4.75

字 数: 90 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 7-5635-1261-6/G · 237

定价: 10.00 元

· 如有印装质量问题请与北京邮电大学出版社营销中心联系 ·

人工智能科普丛书

编委会

主 编：涂序彦
 常务副主编：王 普
 副 主 编：林尧瑞 韩力群
 委 员：(排名不分先后)

涂序彦	北京科技大学	教授
韩力群	北京工商大学	教授
蔡自兴	中南大学	教授
林尧瑞	清华大学	教授
童天湘	中国社科院	研究员
蔡庆生	中国科技大学	教授
孙增圻	清华大学	教授
谭 民	中科院自动化所	研究员
王 普	北京工业大学	教授
刘 宏	北京大学	副教授
钟义信	北京邮电大学	教授
何华灿	西北工业大学	教授
邱玉辉	西南师范大学	教授
王天然	中科院沈阳自动化所	研究员
刘增良	国防大学	教授
杨义先	北京邮电大学	教授
秦世引	北京航空航天大学	教授
杨天梁	清华大学	高级工程师
王昆翔	中国公安大学	教授
洪炳熔	哈尔滨工业大学	教授

总 序

“智能化”意味着“智能科学技术”在各行各业的广泛普及和应用,是信息化、自动化、数字化发展的新阶段。“智能化”是当前新技术、新产品、新产业的发展方向与显著标志,如智能制造、智能管理、智能通信、智能设计、智能计算、智能优化、智能调度、智能检测、智能仪表,智能自动化、智能网络、智能计算机、智能机器人、智能玩具、智能家电、智能汽车、智能交通、智能建筑、智能小区,等等。

“智能科学技术”研究“智能”的理论方法与应用技术,研究开发智能系统的方法与实现技术。“智能科学技术”是人工智能科学技术向综合智能科学技术发展的新时期,是信息科学、知识科学向智能科学发展的新阶段,是思维科学、认知科学、生命科学与计算机科学、自动化科学、信息科学、系统科学等多学科综合集成的新领域,具有重大的科学意义与广阔的应用前景。

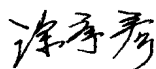
“智能”应当包括:生物智能(首先是人的智能)、机器智能(特别是计算智能)、人机结合的协同智能。“智能”是多层次的(如:思维层、感知层、行为层),是多种类的(如:人的智能、机器智能、人机协同智能),是多模式的(如:集中智能与分布智能,个体智能与群体智能)。“智能科学技术”的研究、开发及应用不仅包括:“人的智能”,而且还涉及“人工情感”、“人工心理”、“人工生命”、“人工社会”等的研究、开发及应用。

为了提高全民的科学素质,传播科学思想,创导科学方法,普及科学知识,实现科教兴国的发展战略,需要大力普及现代科学

技术知识,因此,中国人工智能学会与北京邮电大学出版社决定合作组织我国智能科学技术领域的知名专家,编辑出版人工智能科普丛书。

人工智能科普丛书的出版发行,将进一步推动我国智能科学技术的普及和应用,为提高全民科学素质,实现科教兴国做出贡献。

人工智能科普丛书编委会主任



2005 年 1 月 16 日

前 言

自然界生物历经千百万年的自然选择与进化获得了非凡的环境适应能力。对自然界生物的研究和模仿对于人类科学技术的进步具有重要的作用。

鱼类作为水中生物进化的典范,其游动运动方式具有极高的运动效率和机动性。对鱼类游动运动方式的大量研究始于1936年英国生物学家 Gray 的一篇论文。Gray 通过细致的观察和研究提出了著名的 Gray 悖论,吸引了众多学者开展对鱼类运动的研究工作。机器鱼的研究就是在已有研究工作的基础上,一方面通过研制机器鱼并进行实验来探讨鱼类高效率、高机动性游动的秘密,一方面在已有理论研究的基础上探索采用水下仿生推进方式的新型运载工具及其应用。

机器鱼的研究工作涉及到很多不同的研究领域,如数学、水动力学、仿生学、人工智能、控制理论、材料学、计算机科学、机械学、通讯、传感器技术等等。本书在国内外学者研究成果的基础上,对机器鱼相关的各方面研究工作进行了粗略介绍,以使人工智能、仿生机器人的爱好者和其他领域学者对这一领域的工作有进一步了解。

本书是一本科普读物,参考了众多学者在这一领域发表的论文、报告,采用了从互联网上收集的大量相关资料,以及作者所在研究组的研究工作结果。由于作者水平有限且所从事研究工作仅专注于机器鱼研究领域的某一方面,对其他方面相关资料、文献的理解难免有错误或疏漏,请广大读者批评指正。

全书采用的资料来源广泛,若在引文的标注上有所遗漏,请谅解并予以指正。

作者所在研究组在机器鱼方面的研究工作得到国家 863 计划、国家自然科学基金等项目的大力支持,得到北京航空航天大学机器人研究所王田苗教授、梁建宏博士、魏洪兴博士的热情帮助与密切合作,在此对他们深表感谢。

同时,本书所述部分内容是与曹志强、喻俊志、桑海泉、张志刚、沈志忠、王龙、周超、董翔、陈尔奎、杨清海等同事密切合作的结果,在此对其出色的研究工作表示深深的敬意。

王 硕 谭 民
2006 年 4 月 3 日于北京

目 录

1 多姿多彩的鱼类与机器鱼

1.1 多姿多彩的鱼类	3
1.2 机器鱼能做什么	5
1.2.1 机器鱼研究的目的	7
1.2.2 机器鱼应用示例	7
1.3 机器鱼范例	9

2 鱼类的形体结构与机器鱼的机构设计

2.1 鱼类独特的形体结构	17
2.1.1 鱼类的体形分类	18
2.1.2 鱼类头部的外形	19
2.2 鱼鳍的形状与结构	20
2.3 机器鱼外形与游动机构的设计	22
2.3.1 机构设计过程	22
2.3.2 被模仿鱼类的选择	24
2.3.3 鱼类的皮肤与机器鱼的蒙皮	25

2.3.4	铰链结构的机器鱼尾部	27
2.3.5	机器鱼尾部结构设计参数	28
2.3.6	仿生机器鱼示例	29
2.4	机器鱼浮潜机构的设计	30
2.4.1	鱼类的上浮下潜运动	31
2.4.2	机器鱼上浮下潜的方法	32
2.4.3	安装胸鳍的机器鱼示例	34
2.5	机器鱼的驱动系统	35
 3 鱼类游动的秘密与机器鱼运动控制		
3.1	鱼类运动的推进模式	41
3.2	鱼类游动的秘密	46
3.3	鱼类游动过程的研究	49
3.4	机器鱼的游动控制方法	55
 4 鱼类洄游与机器鱼的定位导航		
4.1	鱼类的洄游	61
4.2	机器鱼的定位与导航	63
4.2.1	依靠地理特征实现导航	63
4.2.2	依靠惯性导航系统	66
4.2.3	依靠卫星定位系统或声学定位系统	66

5 鱼类的感知与机器鱼的传感器系统

5.1 鱼类视觉与机器鱼的视觉感知	78
5.1.1 鱼类的视觉	78
5.1.2 机器鱼的视觉感知	80
5.2 鱼类听侧系统与机器鱼的姿态、距离感知	83
5.2.1 鱼类的听侧系统	83
5.2.2 机器鱼的姿态感知与测距	84
5.3 鱼类的味觉、嗅觉与机器鱼的化学物质检测	89
5.3.1 鱼类的味觉和嗅觉	89
5.3.2 机器鱼的化学物质感知	90
5.4 鱼类的电磁感受与机器鱼电磁场感知	94
5.4.1 鱼类的电磁感受	95
5.4.2 机器鱼的电磁感知传感器	96
5.5 其他类型传感器	97

6 鱼类的行为与机器鱼的决策系统

6.1 纷繁复杂的鱼类行为	101
6.2 机器鱼的行为	102
6.3 机器鱼的决策系统结构	107
6.3.1 “感知-规划-执行”模式	108

6.3.2 “包容式结构”模式	109
6.3.3 “反应式控制结构”模式	112
6.3.4 “分层递阶型结构”模式	113
6.3.5 “混合型结构”模式	114
7 机器鱼的未来	
7.1 机器鱼的未来发展	119
7.2 其他类型机器鱼	121
7.3 结束语	124
附录 机器鱼研究现状	125
参考文献	137



多姿多彩的鱼类与机器鱼



ROBOT
FISH



“海阔凭鱼跃，天高任鸟飞”，人类自古以来就对自然界生物所拥有的独特本领羡慕不已。特别是在水中，鱼类高超的游泳技巧、优美的运动姿态、广阔的活动空间给人类无限的遐想和启示。

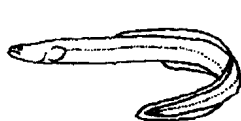
1.1 多姿多彩的鱼类

鱼类远在人类出现之前,就已经活跃于江、河、湖、海之中。历经千万年的进化,鱼类形成了繁多的种类,演化出各种不同的身体形状、结构和运动方式,适应着各种不同的水下生存环境。

图 1-1 给出了几种不同身体形状、结构的鱼类。



(a) 团头鲂 (侧扁形)



(b) 日本鳗鲡 (棒形)



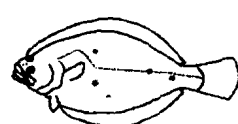
(c) 驼背三棱箱鲀 (箱形)



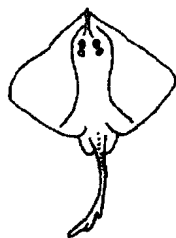
(d) 蓝圆鲹 (纺锤形)



(e) 六斑刺鲀 (球形)



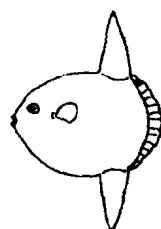
(f) 褐牙鲆 (不对称形)



(g) 斑鲆 (扁平形)



(h) 日本海马 (海马形)



(i) 翻车鱼 (翻车形)

图 1-1 多姿多彩的鱼类
(源于王军、江素菲、苏永全编著的《鱼类学实验》)

鱼类有的生活在静水中,有的生活在流水中,有的生活在湖泊,有的生活在海洋。有些鱼类的形体、结构使其适于长时间运动;有些则能够快速启动、迅速加速;有些可以在复杂的珊瑚礁、海草之间自由穿梭;有些则能够跃出水面在空中滑翔。

据有关资料记载:



海洋中的箭鱼是游得最快的鱼类,其时速能够达到 110 km/h ;古巴的跳鱼可以跳出水面 5 m 以上;飞鱼能以 40 km/h 的速度跃出水面,在风力适当时,可以在离水面四五米的空中滑翔二三百米之远;大麻哈鱼可以以 $40\sim 50 \text{ km/h}$ 的速度一昼夜不停歇地逆流而上;炮弹鱼可以在珊瑚礁中自由穿梭、捕食。

鱼类不仅仅具有高效的运动方式和优越的机动性能,而且还具有很多独特的本领。它们有的可以感知水中某些微量的化学物质,有些能听到水中微弱的声音,有些则能够感受几百米外水中产生的振动。如埃及的尼罗河中有一种象鼻鱼,这种鱼长着一个形似大象鼻子的长嘴。虽说个头不大,但它们的感受却非常灵敏。它们的尾部能像雷达那样发射电脉冲,而且脉冲随着河水的变化而变化。如果河水干净,它每分钟发出的脉冲可达 $400\sim 800$ 次;要是水中有污染物,它发出的电脉冲就会降到 200 次以下。因此,它可以成为很好的“水质监测员”。金鱼对水中的锌离子浓

度很敏感,而鳙鱼对水质的污染也比较敏感。鲨鱼也具有极其敏感的嗅觉,能够闻到数里外的血液等极细微物质,并追踪出其来源。有实验表明,饥饿的鲨鱼能够检测到浓度为 1×10^{-1} 的食物提取液。鲤科鱼类在受到其他凶猛的捕食鱼类袭击后,受伤的皮肤可以释放出一种微量的警戒物质,而这些极其微量的物质则立即引起同种鱼类或相近种鱼类的恐慌,并使其迅速躲藏起来。

1.2 机器鱼能做什么

鱼类所具有的高超的游泳技巧、灵敏的感觉为人类解决许多实际问题提供了很好的思路。鱼类具有以下特征:

特征一 鱼类运动的高效率

鱼类能够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。依靠尾和鳍的协调摆动,普通鱼类的游动推进效率可达 80% 以上,鳐科鱼类的推进效率超过 90%,而普通船舶推进器的平均效率只有 40%~50%;在具有极高运动效率的同时,鱼类还具有极高的游速,黄鳍鲂鱼的速度可达 40 节,接近每小时 80 km 以上;而梭子鱼、白斑狗鱼更可以用 20 倍于重力加速度的加速度迅速起动来掠取猎物。

特征二 鱼类运动的高机动性