

人工智能系列

# 机器人运动控制

仿生机器鱼多模态运动CPG控制及优化

汪明 喻俊志 著



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>

人工智能系列

# 机器人运动控制

仿生机器鱼多模态运动CPG控制及优化

汪明 喻俊志 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书由浅入深,兼具仿生机器鱼设计、研制、CPG 理论、控制、优化等内容,写作上力求文字通俗易懂,通过对仿生机器鱼 CPG 控制的阐述为设计多模态仿生运动控制器提供新思路,同时为广大机器人技术爱好者提供理论与实践参考。

本书读者对象为仿生机器人技术爱好者、大中专院校的学生和老师、仿生机器人公司的技术人员、机器人控制的初学者、相关培训学校的学员等。

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

机器人运动控制:仿生机器鱼多模态运动 CPG 控制及优化/汪明,喻俊志著. —北京:电子工业出版社, 2017.6

(人工智能系列)

ISBN 978-7-121-31902-0

I. ①机… II. ①汪… ②喻… III. ①仿生机器人—海洋机器人—运动控制—研究

IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 127980 号

策划编辑:牛平月

责任编辑:赵娜

印刷:北京季蜂印刷有限公司

装订:北京季蜂印刷有限公司

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:720×1000 1/16 印张:10.25 字数:224 千字

版次:2017 年 6 月第 1 版

印次:2017 年 6 月第 1 次印刷

定价:48.00 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](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式:(010) 88254454, [niupy@phei.com.cn](mailto:niupy@phei.com.cn)。

# 前 言

基于中枢模式发生器 (Central Pattern Generator, CPG) 机制的机器人运动控制方法给仿生机器人, 特别是仿生机器鱼的研究带来新的机遇和挑战。一些学者研制仿生机器鱼, 旨在通过水下仿生研究, 一方面探索鱼类的减阻机制和复杂运动的控制机理, 另一方面研究集高效性、机动性、灵活性和隐形性于一体的新一代无人水下航行器本体设计与控制技术。本书从分析仿生机器鱼的游动机理入手, 内容涵盖仿生机器鱼本体设计、样机研制、CPG 控制方法、CPG 神经元振荡器、CPG 网络拓扑、仿生机器鱼动力学建模、链式仿生机器鱼 CPG 控制建模、CPG 反馈控制、仿生机器鱼多模态运动控制、CPG 控制优化等方面, 为设计通用的机器人多模态 CPG 运动控制器奠定了一定的基础。

仿生机器鱼 CPG 控制是全书的主线, 作者将 CPG 模型耦合到仿生机器鱼动力学模型中, 探讨了 CPG 的参数变化对仿生机器鱼运动行为的影响; 针对具有胸鳍的多关节仿生机器鱼, 构建了最近相邻耦合的 CPG 模型来解决多模态运动控制问题; 传感器信息为仿生机器鱼 CPG 运动控制提供环境信息, 高级控制中枢下行命令的传递使仿生机器鱼获得更高的智能, 基于有限状态机的模式切换控制方法将 CPG 的结构、拓扑、耦合类型、高层命令、反馈信号等耦合在一起, 实现了频率、幅值和网络构型的自适应切换, 提高了仿生机器鱼运动的适应性、机动性和高效性。在此基础上, 以动力学模型得到的游动速度最大化为目标, 采用粒子群优化算法对 CPG 模型中决定仿生机器鱼游动的频率、幅值及相位差等参数进行了优化, 实现了仿生机器鱼的优化控制。

形成闭环控制是实现机器人自主控制的有效途径。本书着眼于闭环控制, 侧重三个融合, 即 CPG 与机械本体融合、动力学模型与 CPG 信号融合、环境信息与 CPG 模型融合。反馈信息的引入能使仿生机器鱼适应复杂的非结构化水域环境, 同时能够实现仿生机器鱼多模态间的快速、平滑切换, 增强仿生机器鱼游动的环境适应性。本书探讨的 CPG 反馈控制, 为仿生机器鱼的自主游动、路径规划、最优策略制定等提供了理论与技术支撑。

本书由浅入深, 兼具仿生机器鱼设计、研制、CPG 理论、控制、优化等内容, 写作上力求文字通俗易懂, 通过对仿生机器鱼 CPG 控制的阐述为设计多模态仿生运动控制器提供新思路, 同时为广大机器人技术爱好者提供理论与实践参考。本书的特点如下。

## 1. 结构合理，内容全面、系统

本书以仿生机器鱼 CPG 控制为主线，内容涉及仿生机器鱼本体设计、设计步骤、样机研制、CPG 控制方法、CPG 神经元振荡器、CPG 网络拓扑、仿生机器鱼动力学建模、仿生机器鱼链式弱耦合 CPG 控制建模、CPG 反馈控制、仿生机器鱼多模态控制与模态切换、CPG 控制优化，内容系统、结构合理，全面地阐释了仿生机器鱼 CPG 控制的主要内容。

## 2. 理论与实践结合

本书主要内容不仅有理论分析，而且有仿真和实验等内容，力求让读者掌握仿生机器鱼 CPG 控制的思维、方法与流程，进而更清晰地完成仿生机器人运动 CPG 控制系统的设计，从而避免枯燥地列出一系列公式，让读者自己去填补理论与实践的鸿沟。

## 3. 由浅入深，学以致用

本书从零开始，介绍了仿生机器鱼的应用目的及意义，CPG 及其特点，机器人 CPG 控制现状等方面的内容，接着开始仿生机器鱼本体设计，完成了仿生机器鱼动力学建模。在此基础上，全书由浅入深，从 CPG 神经元振荡器开始，到 CPG 网络构成，再到 CPG 反馈控制，最后到 CPG 优化，层层递进，辅以仿真和实验，让读者学以致用。

## 4. 语言通俗，图文并茂

作为一本仿生机器人应用技术丛书，笔者采用浅显易懂的语言完成了专业知识的解说；为了能让读者更好地理解，笔者追求内容编写图文并茂，避免了枯燥乏味的大段文字，力求让读者能够通过图文更加形象地掌握仿生机器鱼的 CPG 控制相关的方法与知识。

全书共 7 章，具体内容介绍如下。第 1 章，主要综述了中枢模式发生器 (Central Pattern Generator, CPG) 控制方式、特点和模型，并阐述了仿生机器鱼研究的主要内容、研究目的及意义，在此基础上，论述了机器人 CPG 控制的发展状况，探讨了 CPG 控制的研究方向。

第 2 章，主要针对鱼类的形态和运动机理由浅入深地给出了进行仿生机器鱼设计与优化的方法和步骤。首先根据鱼类游动的特点，提取仿生机器鱼的形体参数和运动参数，建立了仿生机器鱼运动学模型。根据该模型，仿生机器鱼的运动被建模为多关节的摆动运动，其流线形的鱼体用一平面样条曲线表示，新月形的尾鳍用一摆动的水翼表示，其控制参数为与鱼体的外形和尺寸无关的关节摆动数组和摆动频率。其次，总结了仿生机器鱼的设计步骤，并根据实际元器件和实现

方法的约束,对仿生机器鱼进行结构设计优化。最后,开发研制了多关节仿生机器鱼样机。

第3章,分析了仿生机器鱼在水中的受力情况,应用 Lagrange 方法建立了仿生机器鱼的动力学模型。在此基础上,针对具有左右胸鳍的多关节仿生机器鱼进行了动力学仿真研究。仿真时以 CPG 的输出驱动鱼体各部分进行运动,由此得到相关的游动结果。仿真结果表明通过改变 CPG 模型的相位耦合关系和输入激励的大小,能获得不同的运动模态,验证了所建仿生机器鱼动力学模型的有效性。动力学建模与仿真可以用来仿真身体和环境的物理特性,为它们提供了一个初步的近似,这对仿生机器鱼控制具有导向作用。

第4章,阐述了 CPG 神经元振荡器模型,多关节仿生机器鱼运动 CPG 控制建模,多模态游动分析及实验等方面内容,主要针对具有胸鳍推进机构的多关节仿生机器鱼,以一类振荡频率和幅值可以独立控制的非线性振荡器为基础,采用最近相邻关节耦合的方式构建了仿生机器鱼链式 CPG 模型,分析了其振荡功能单元平衡点的性态,证明了极限环的存在性、唯一性和稳定性,探讨了仿生机器鱼的链式 CPG 模型中各单元的耦合关系。利用该 CPG 模型实现了直游、倒游、胸鳍-身体尾鳍协调运动等多种游动模式。

第5章,探讨了 CPG 耦合传感器信号的机理,设计了在不同部位引入传感器信号的反馈控制方法。在此基础上,针对多关节带胸鳍的仿生机器鱼提出了基于有限状态机的运动模式切换控制方法,解决了仿生机器鱼复杂运动中 CPG 构型选择的问题。基于有限状态机的模式切换控制方法将 CPG 的结构、拓扑、耦合类型、输入信号、反馈信号等耦合在一起,实现了频率和构型的自适应控制,为仿生机器鱼自主游动控制奠定了基础。

第6章,综合仿生机器鱼游动机理,通过引入收敛速度调节因子来加快 CPG 模型的收敛速度,完成了一类频率、幅值、相位可单独调节的 CPG 控制模型的特性分析与运动融合。在对仿生机器鱼进行动力学分析的基础上,以动力学模型得到的游动速度最大化为目标,采用粒子群优化算法对 CPG 模型中决定仿生机器鱼游动的频率、幅值及相位差等参数进行了优化,最终获得了 1.14 倍体长/秒的最高游速。

第7章,对全书内容作了总结,并展望了仿生机器鱼的发展及 CPG 控制的未来研究方向。

作者

2017年5月

# 目 录

|                          |      |
|--------------------------|------|
| 第 1 章 绪论                 | (1)  |
| 1.1 引言                   | (1)  |
| 1.2 仿生机器鱼主要研究内容          | (2)  |
| 1.3 仿生机器鱼的研究目的及意义        | (3)  |
| 1.4 CPG 及 CPG 控制方法       | (4)  |
| 1.4.1 CPG 及其特点           | (4)  |
| 1.4.2 CPG 控制方法           | (5)  |
| 1.5 机器人 CPG 控制的国内外研究现状   | (7)  |
| 1.5.1 CPG 原理在机器人控制领域的应用  | (7)  |
| 1.5.2 机器人 CPG 控制的国外研究现状  | (7)  |
| 1.5.3 机器人 CPG 控制的国内研究现状  | (10) |
| 1.6 CPG 数学模型             | (13) |
| 1.6.1 CPG 模型简介           | (13) |
| 1.6.2 CPG 生物学模型          | (14) |
| 1.6.3 递归振荡器模型            | (16) |
| 1.6.4 相位振荡器模型            | (18) |
| 1.6.5 CNN 模型             | (19) |
| 1.6.6 Van der Pol 神经元振荡器 | (20) |
| 1.6.7 环堆栈模型              | (20) |
| 1.7 CPG 控制的系统实现及未来发展     | (21) |
| 1.7.1 CPG 控制的系统实现        | (21) |
| 1.7.2 CPG 控制的发展方向        | (22) |
| 本章参考文献                   | (24) |
| 第 2 章 仿生机器鱼本体设计          | (39) |
| 2.1 引言                   | (39) |
| 2.2 鱼类学基础                | (40) |
| 2.3 鱼类游动的物理模型及特征参数       | (42) |
| 2.4 鱼类游动的运动学模型及优化        | (44) |
| 2.4.1 鱼类运动学模型的简化         | (45) |
| 2.4.2 鱼体波曲线方程的改进         | (48) |

|              |                         |              |
|--------------|-------------------------|--------------|
| 2.4.3        | 仿生机器鱼的设计参数优化            | (48)         |
| 2.5          | 机器鱼设计中的几个水动力学问题         | (50)         |
| 2.5.1        | 水动力学外形的设计               | (50)         |
| 2.5.2        | 重心和浮心的平衡                | (51)         |
| 2.5.3        | 驱动电机最大扭矩的估算             | (51)         |
| 2.6          | 机器鱼运动学模型的数值仿真           | (52)         |
| 2.7          | 仿生机器鱼的设计步骤              | (55)         |
| 2.8          | 仿生机器鱼机构设计               | (56)         |
| 2.8.1        | 偏航头部设计                  | (57)         |
| 2.8.2        | 多自由度胸鳍机构设计              | (58)         |
| 2.8.3        | 多关节鱼体及尾鳍设计              | (59)         |
|              | 本章参考文献                  | (59)         |
| <b>第 3 章</b> | <b>耦合 CPG 的机器鱼动力学建模</b> | <b>(61)</b>  |
| 3.1          | 引言                      | (61)         |
| 3.2          | 仿生机器鱼动力建模               | (62)         |
| 3.2.1        | 仿生机器鱼受力坐标系建立            | (62)         |
| 3.2.2        | 仿生机器鱼受力分析               | (64)         |
| 3.2.3        | 仿生机器鱼动力学建模              | (66)         |
| 3.3          | 耦合 CPG 的仿生机器鱼动力学仿真      | (69)         |
| 3.4          | 仿生游动控制实验                | (75)         |
|              | 本章参考文献                  | (76)         |
| <b>第 4 章</b> | <b>仿生机器鱼运动 CPG 控制</b>   | <b>(78)</b>  |
| 4.1          | 仿生机器鱼 CPG 建模            | (78)         |
| 4.1.1        | 神经元振荡器                  | (78)         |
| 4.1.2        | 仿生机器鱼 CPG 模型            | (82)         |
| 4.1.3        | CPG 模型参数调节              | (86)         |
| 4.2          | 仿生机器鱼 CPG 控制游动实验        | (90)         |
| 4.2.1        | 仿生机器鱼样机研制               | (90)         |
| 4.2.2        | CPG 控制游动实验              | (92)         |
|              | 本章参考文献                  | (98)         |
| <b>第 5 章</b> | <b>CPG 反馈控制与多模态运动</b>   | <b>(100)</b> |
| 5.1          | 引言                      | (100)        |
| 5.2          | CPG 反馈控制方案设计            | (101)        |
| 5.3          | CPG 反馈控制建模与分析           | (102)        |
| 5.3.1        | CPG 内部耦合反馈信号建模          | (102)        |
| 5.3.2        | CPG 输出部耦合反馈信号建模         | (105)        |



|              |                          |              |
|--------------|--------------------------|--------------|
| 5.3.3        | 高层感觉反馈控制建模               | (107)        |
| 5.4          | 运动模态选择与切换控制              | (110)        |
| 5.5          | 多模态运动实验: 机器海豚游动实验        | (112)        |
| 5.5.1        | 机器海豚设计与样机研制              | (112)        |
| 5.5.2        | 机器海豚运动仿真                 | (113)        |
| 5.5.3        | 机器海豚多模态游动实验              | (116)        |
| 5.6          | 多模态运动实验: 两栖机器人实验         | (120)        |
| 5.6.1        | 两栖机器人设计与样机研制             | (120)        |
| 5.6.2        | 两栖机器人 CPG 控制建模           | (122)        |
| 5.6.3        | 两栖机器人水陆切换实验              | (127)        |
|              | 本章参考文献                   | (129)        |
| <b>第 6 章</b> | <b>仿生机器鱼 CPG 控制优化</b>    | <b>(131)</b> |
| 6.1          | 基于 CPG 的倒游控制             | (131)        |
| 6.1.1        | 倒游控制实现                   | (131)        |
| 6.1.2        | 两类仿鲹科机器鱼倒游运动控制方法对比       | (132)        |
| 6.2          | CPG 模型收敛速度优化             | (138)        |
| 6.3          | 基于 PSO 的 CPG 控制优化        | (141)        |
| <b>第 7 章</b> | <b>总结与展望</b>             | <b>(148)</b> |
| 7.1          | 总结                       | (148)        |
| 7.1.1        | 仿生机器鱼本体设计与样机研制           | (148)        |
| 7.1.2        | 仿生机器鱼动力学建模               | (149)        |
| 7.1.3        | 仿生机器鱼 CPG 控制建模           | (149)        |
| 7.1.4        | CPG 反馈控制与多模态运动           | (150)        |
| 7.1.5        | 仿生机器鱼 CPG 控制优化           | (150)        |
| 7.2          | 仿生机器鱼 CPG 控制展望           | (151)        |
| 7.2.1        | 仿生机器鱼机械本体-CPG-环境系统的稳定性研究 | (151)        |
| 7.2.2        | 在线学习与环境适应性研究             | (151)        |
| 7.2.3        | 新材料、新结构与 CPG 控制          | (152)        |
| 7.2.4        | CPG 控制的工程设计方法            | (152)        |

# 第 1 章

## 绪 论

神经生物学研究表明,动物的节律行为是由中间神经元构成的局部振荡网络——中枢模式发生器(Central Pattern Generator, CPG)产生和控制的。CPG主要通过神经元之间的相互抑制实现自激振荡,产生稳定的周期信号,从而实现肢体或躯体相关部位的节律运动控制。仿生机器鱼的稳态游动可通过身体、尾鳍和胸鳍的节律运动来实现。本章主要阐述了仿生机器鱼研究的主要内容、研究目的及意义,在此基础上,综述机器人CPG控制的研究状况,探讨了CPG控制的发展方向。

### 1.1 引言

自然界的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,也可以在初始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,鲹科鱼类的推进效率甚至超过90%,而普通的人造推进器的平均效率只有40%~50%。此外,鱼类可迅速地以只有10%~30%体长的距离为转弯半径来变换行进方向,而一般船舶须以3~5倍体长的半径缓慢地回转<sup>[1~3]</sup>。这些数据表明,鱼类的游泳本领远高于人类现有的航海科技。鱼类的这种高效、快速、机动灵活的水下推进方式,可能会给未来航行推进带来技术性的变革,包括水下潜器、船舶工程、微小型武器平台及作战模式的改变。鱼类在水中运动的完美性,吸引了生物学家研究鱼类的运动机理,机器人学者则希望制造出和真鱼一样的仿生机器鱼<sup>[4~10]</sup>。

随着科学技术的发展,1994年美国麻省理工学院(MIT)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<sup>[10]</sup>。此后,结合仿生学、材料学、机械学和自动控制的新发展,仿生机器鱼研制渐成热点。仿生机器鱼作为鱼类推进机理和机器人技术的结合点,它为研制高效、高机动性、低噪声和易隐蔽的水下航行器提供了一种新思路。一旦步入应用,机器鱼

将在复杂环境下的水下作业、海洋监测、海洋生物观察、军事侦察、搜索救援等方面发挥重要作用<sup>[2,11]</sup>。

## 1.2

# 仿生机器鱼主要研究内容

仿生机器鱼 (Biomimetic Robot Fish, 又名机械鱼、人工鱼或鱼形机器人) 顾名思义, 即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) 来实现水下推进的一种运动装置<sup>[12]</sup>。从仿生的角度来说, 机器鱼的推进运动是基于鱼类的游动技能及其解剖学结构, 靠波动或摆动的鱼体以及控制自如的鳍和大展弦比的月牙尾来实现的。

仿生机器鱼推进技术无论是推进机理还是实现形式都完全不同于传统的螺旋桨推进技术, 它不仅具有快速性和机动性, 而且具有高效性, 目前已成为水下推进领域的研究热点之一。从 1990 年至今, 人们已提出了各式各样的仿生机器鱼设计和控制, 并开始了仿生机器鱼样机的研制。机器鱼是一种多学科交叉的研究领域, 其涉及的主要学科有仿生学、流体动力学、自动控制科学、材料科学和机械电子学等。从近期来看, 仿生机器鱼研究要解决的具体问题主要包括如下内容。

### ● 鱼类推进理论模型的研究

建立鱼类推进的运动学模型和水动力学模型是仿鱼推进器研制的设计依据, 然而由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、过于烦琐, 很难应用于实际控制设计中。从现有的文献来看, 完善的、适于控制的水动力学建模问题依然是仿生机器鱼研究的主要内容之一。根据鱼类游动推进的形态学和运动学特征, 建立精确的、定量的描述推进运动和适于控制系统设计的运动学及动力学模型将加快仿生机器鱼推进技术的应用步伐。

### ● 仿生机器鱼本体结构的设计

在鱼类的进化过程中, 不同的环境进化出不同外形和种类鱼。在仿生机器鱼的设计过程中, 如何选择合适的材料和驱动方式, 结合鱼类的推进机理来提取合适的形态参数和运动参数, 从而达到仿生机器鱼的结构最优、推进效率最高的目标, 已成为仿生机器鱼设计与研制工作的关键环节。

### ● 运动学方程—游动速度—推进效率的内在关系探索

鱼类在游动过程中, 通过摆动尾鳍产生合理的流场来获得推力, 这一过程伴随有非定常涡的产生。从这个意义上说, 仿鱼推进技术的核心问题是涡控制。在自然界, 鱼类通过身体两侧的侧线器官感知周围流场的情况, 并且动态地调整身体的形状使阻力最小, 推力最大。而由鱼体和尾鳍构成的刚性系统在流体环境中运动时产生的动力学和流体力学耦合问题, 现在还停留在实验测量阶段。如何将实验测量和理论分析结合起来, 探讨仿生机器鱼游动运动学方程的一游动速度—

推进效率等方面的内在规律,可为其运动控制提供理论基础及方法指导<sup>[13]</sup>。

### ● 仿生机器鱼的控制性能研究

在运动过程中,由于仿生机器鱼的形状随运动而动态地改变,引起的流体附加质量效应使得鱼体很难保持平衡。对于仿生机器鱼运动过程中的推进和稳定性的矛盾,我们认为应当遵循“稳定第一,控制第二,推进第三”的原则,合理、有效地控制是连接稳定性和快速性的桥梁。随着传感技术和控制技术的发展和视觉、超声和姿态等传感器集成到机器鱼本体上,采用多传感器信息融合方法来提高机器鱼与环境的交互能力,从而实现仿生机器鱼的自主控制,将大大提高仿生机器鱼对环境的适应性,拓宽机器鱼的应用范围。

从控制的角度来看,对装备有各种传感器的仿生机器鱼的控制研究内容通常包括以下内容。

### ● 定位与导航技术研究

目前,机器鱼大都在 2D 平面运动,当具有上浮/下潜功能后,无疑会增加机器鱼的运动范围,同时也增大了控制难度。无论是机器鱼单体还是群体,一旦步入应用阶段,定位与导航将是一个不容回避的难题。在 2D 环境中,利用视觉导航或 GPS (Global Positioning Systems) 导航或许是一种有效的方法。在 3D 水下环境,可利用声呐、水下视觉等来获取环境信息。针对部分未知或完全未知的环境,如何从大量信息中快速、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。

### ● 游动控制算法的研究

仿生机器鱼的游动控制大体可分为速度控制和方向控制。在运动学和动力学模型尚不完善的情况下,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开展仿生机器鱼智能控制算法研究,可有效提升机器鱼的可控性和机动性。

### ● 多机器鱼的协调协作研究

参照多智能体理论,建立多机器鱼分布式控制系统。在此基础上,开展多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。

## 1.3

## 仿生机器鱼的研究目的及意义

21 世纪是人类开发海洋的世纪。随着陆地资源的日益枯竭,人们把目光投向了拥有丰富资源和巨大开发价值的海洋,适应各种非结构化环境的水下机器人也将会得到迅猛的发展<sup>[14]</sup>。与传统推进器相比,仿生机器鱼以其效率高、机动性好、噪声低、对环境扰动小的优势将在以下诸多领域得到广泛应用。

● 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，如环境监测、军事侦察等。

- 要求机动性能高的场合或空间狭窄、空间结构复杂的场所，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。
- 海洋生物观察。常规螺旋桨推进器噪声大，对环境扰动大，使水下运动装置很难接近所要观察的海洋生物，采用静音驱动机器鱼有望解决这一难题。
- 海底勘探及海洋救捞。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，完成常规下潜器所不能完成的作业任务。
- 发军用方面。一方面，利用仿鱼推进技术可制造小型潜航武器、无人驾驶仿生袖珍潜艇。该袖珍潜艇比传统潜艇具有更高的机动性和可操作性，可直接进行水下侦察，发现敌方雷区，跟踪及摧毁敌方潜艇。另一方面，由于机器鱼体积小、成本低、机动性好，可以由水面舰艇、潜艇及飞机等大量携带，成群投放，将在攻击侦察和扫雷等方面发挥重大作用。此外，可利用机器鱼体形小，不易被声呐所探测的特点，平时化整为零在特定海域游弋，当遇到敌方舰队时迅速集结重点攻击，以较小的代价重创敌方。
- 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。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”。随着制造工艺的进步和科学技术的创新，“宠物鱼”将以优美的造型和低廉的价格走向市场。

对于机器鱼个体无法独立完成的复杂或不确定任务，可采用多机器鱼协调来完成。目前国内外多机器鱼协调的研究也是仿生机器人研究的热点之一。多机器鱼协调系统的建立，不仅可以继承多机器人系统的诸多优点，而且可以逐渐揭示或验证鱼类复杂的群体行为，将在海洋探测、太空探险、国土防御等领域发挥重要作用。

## 1.4 CPG 及 CPG 控制方法

### 1.4.1 CPG 及其特点

动物学研究表明，动物的运动是由中枢神经系统分层控制的<sup>[15]</sup>。最简单的运动是反射运动，如膝跳反射，其运动形式固定，反应程度和外界刺激强度有关。

这种固定模式运动有触发门限,如打喷嚏,只有当刺激达到门限,才会被触发,其运动形式也是固定的。最高级的运动是意识运动,受大脑皮层控制,形式复杂。而节律运动介于反射运动与意识活动之间,如走、跑、跳、泳、飞等,形式固定且复杂,需要连续的主动刺激。神经生物学家认为动物的节律行为是由中间神经元构成的局部振荡网络——中枢模式发生器(Central Pattern Generator, CPG)控制,通过神经元之间的相互抑制实现自激振荡,产生稳定的周期信号,从而实现肢体或躯体相关部位的节律运动控制<sup>[15~17]</sup>。

早在1911年, G Brown 就指出猫行走运动必需的基本回路可能存在于脊髓内<sup>[18]</sup>。1961年, D. M. Wilson 首次在蝗虫身体里发现了神经模式发生网络<sup>[19]</sup>; 1966年, Shik 等提出动物的节律运动是由 CPG 控制的论断<sup>[20]</sup>。随后的众多科学家和学者开展了 CPG 在脊椎生物和无脊椎生物中存在的验证及特性的大量研究。其中,生物数学家 Grillner 于1975年指出在鸟、爬行动物、两栖动物以及哺乳动物中均存在 CPG<sup>[21]</sup>; 而在1979年, Grillner 和 Zangger 验证了脊椎动物猫的脊髓中存在 CPG<sup>[22]</sup>。随着研究的深入和科技的进步, CPG 在其他生物中的存在性也逐渐得到了验证<sup>[21~26]</sup>, 如无脊柱动物水蛭的游泳 CPG、龙虾的胃部蠕动 CPG、脊椎动物七鳃鳗的游泳 CPG 等; 1998年, Duysens 和 Crommert 预测了灵长类和人体中存在 CPG 的可能性<sup>[27]</sup>, 后来人体内也被证明存在控制呼吸、胃部蠕动等类型的 CPG<sup>[15,23,26]</sup>。

为探索生物的运动控制机制以及 CPG 机理, 科学家们通过对 CPG 特性的模拟建立生物学 CPG 模型, 以此来推进与 CPG 有关的研究。1992年, Hellgren、Grillner 和 Lansner 建立了基于 Hodgkin - Huxley 神经元模型的 CPG 模型<sup>[28]</sup>, 并通过这些模型计算离子泵和离子通道对膜电势和动作电势(Action potential)产生的影响。CPG 生物学模型建立的目的多数是为了研究小块神经元电路中的节律产生问题, 也有部分工作是为了研究大量神经元涌现出来的整体动力学行为。迄今为止, 针对不同的生物, 已建立了诸多不同的 CPG 生物学模型, 其中被建模的生物主要集中在昆虫和低级脊椎动物上, 较多的有七鳃鳗/鳗鲡<sup>[29~36]</sup>、蝾螈<sup>[37~42]</sup>、青蛙胚胎<sup>[43,44]</sup>、水蛭<sup>[45]</sup>、蝗虫<sup>[46,47]</sup>、猫<sup>[48~50]</sup>等。此外, 基于一些比较抽象的四足动物, 一些研究人员也进行了相关的建模研究<sup>[51~57]</sup>。这些 CPG 的生物学模型不仅有助于研究不同生物的 CPG 概念模型, 而且有助于了解动物运动机制以及进行新的科学探索。

## 1.4.2 CPG 控制方法

动物的运动可分为反射运动、固定模式运动、节律运动和意识运动<sup>[15]</sup>, 而节律运动模式在无脊椎动物和脊椎动物分离出来的中枢神经系统均能发生。产生这

种节律模式输出的重要原因是 CPG 的存在。CPG 是一些神经网络控制有节奏的行为，例如行走、游泳、呼吸或者咀嚼<sup>[15~17]</sup>。对中枢模式发生器的形成起作用的有两种细胞机制，一是单个神经元兴奋性的节律性变化，这种神经元称作起步细胞 (Pacemaker Cell)，它的节律性放电是由膜电位的振荡产生的；二是神经网络成员间的突触相互作用。这两种机制可能一起工作，在神经系统中产生各种各样的节律性活动模式<sup>[15]</sup>。中枢模式发生器一个很重要的特点就是它被证明依赖于神经输入和神经网络的调节状态，完全相同的神经元能产生不同的输出信号。这一原则几乎适用于所有的运动输出系统以及整个神经系统。不同个体的行为具有很多相同的神经回路，并且回路输出信号受激素、动机、昼夜规律、感觉等因素的影响<sup>[17]</sup>。使用相同回路产生不同的行为是比使用不同回路更有效的方法，因此 CPG 受到机器人领域的科学家和工程师们的广泛关注。最初的 CPG 研究主要用来揭示神经元与脑的生物机制，后来被用到肢体或机体修复，再后来被用到仿生机器人的控制，这些应用反过来又验证和揭示了 CPG 的生物机制。

近年来发展起来的基于生物控制的方法 (Bio-Cybernetics Approach) 将高层控制中枢、CPG、反射调节系统等生物控制模型或机理应用于机器人控制，能实现更加自然、协调、多样、具有环境自适应性的运动<sup>[17]</sup>。传统的基于模型的机器人控制方法存在建模复杂、解不唯一、单周期规划等问题，特别是在需要多自由度协调控制的任务中，缺乏足够的实时性。由于 CPG 在协调多自由度运动方面的优越性，CPG 仿生控制受到了越来越多的关注。从控制的观点来看，CPG 是一种能够在缺乏节律控制输入的情况下，产生不同模式的节律输出的神经网络<sup>[15~17]</sup>。其网络的链式或网状结构可利用具有高速并行数据处理能力的超大规模集成电路 (VLSI) 来实现<sup>[57~62]</sup>，这为 CPG 控制的应用和推广提供了可能。基于上述优点，CPG 在多自由度肢体 (或关节) 机器人的运动控制中具有很大的适用性，不仅可以产生多种稳定协调的运动步态，而且可将反馈信号引入控制系统，使机器人具有更强的环境适应能力。

CPG 网络作为一种运动控制机制，由高层中枢 (大脑、小脑) 发出运动指令，控制节律运动的起始，通过综合 CPG 的中枢反馈信息、本体感受信息、视觉信息等对运动进行监控。来自躯体感受器的反馈信息通过生物反射机制，协调 CPG 与环境、本体的关系，对 CPG 的输出进行调节。CPG 的主要特点在于<sup>[16,17,23,63,64]</sup>：①可以在缺失高层命令和外部反馈的情况下产生稳定的节律信号；②简单的激励输入信号可以产生多样性的节律输出；③通过相位滞后调节，可以产生多种稳定、自然的相位关系，实现不同的运动模式；④易于集成反馈信号，形成反馈控制系统；⑤易于和物理系统耦合，使节律行为在整个系统中传导；⑥易于用于分布式控制；⑦结构简单，且有很强的鲁棒性和适应性。这些特点十分适合于机器人的运动控制，因此，CPG 常被用作机器人运动的底层控制器，通过调节 CPG 模型参

数使机器人的各个关节协调运动，从而在线产生自然、协调、多样、具有环境自适应性的步态。

## 1.5 机器人 CPG 控制的国内外研究现状

### 1.5.1 CPG 原理在机器人控制领域的应用

CPG 控制作为对动物运动控制神经系统的仿生，从 1961 年 Wilson 发现神经模式发生网络开始<sup>[18]</sup>，到 20 世纪 80 年代 CPG 建模和特性研究，再到 20 世纪 90 年代 CPG 的工程应用，其理论体系日趋完善，应用范围逐渐扩大。2005 年，国际杂志 *Neuroinformatics* (vol. 3, no. 3) 推出了 *Neurobotic Models in Neuroscience and Neuroinformatics* 特刊<sup>[65]</sup>，报道了可用于机器人的神经控制模型的最新研究进展，其中就有通过 CPG 控制实现仿蝶螈 (salamander) 推进的实例<sup>[39]</sup>。大体来说，基于 CPG 控制的研究主要包括：①CPG 的理论体系和方法，包括 CPG 建神经元的振荡器建模、CPG 网络拓扑、CPG 信号编码、CPG 模型的稳定性、收敛性分析、CPG 输出波形分析、离散和节律运动的混合控制方法、步态切换等；②CPG 控制的系统实现，涉及 CPG 芯片设计、CPG 微控制器设计与实现、CPG 控制嵌入式编程等；③CPG 的工程应用，主要对 CPG 的理论、方法、硬件和软件等进行工程实施。从工程上讲，CPG 神经电路由一系列非线性振荡器组成，因此对神经振荡器建模是实现 CPG 工程应用的基础。

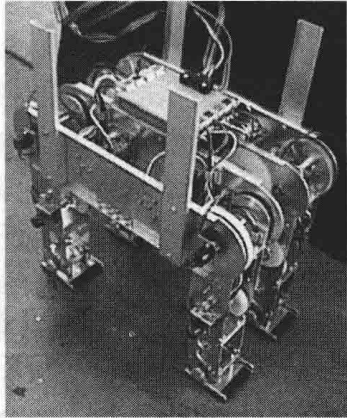
### 1.5.2 机器人 CPG 控制的国外研究现状

1985 年，日本 Matsuoka 通过对生物神经细胞活动的研究，在漏极积分器微分方程中加入模拟神经元疲劳特性的适应项，由此构成神经元，并通过神经元之间相互抑制建立了 Matsuoka 神经振荡器模型<sup>[66]</sup>。在此基础上，Matsuoka 研究了该 CPG 模型在改变激励或突触权重的情况下网络特性的变化，为 CPG 的应用提供了参考和依据<sup>[67]</sup>。然而，Matsuoka 振荡器只提供正值输出信号，这限制了其在工程中的应用。

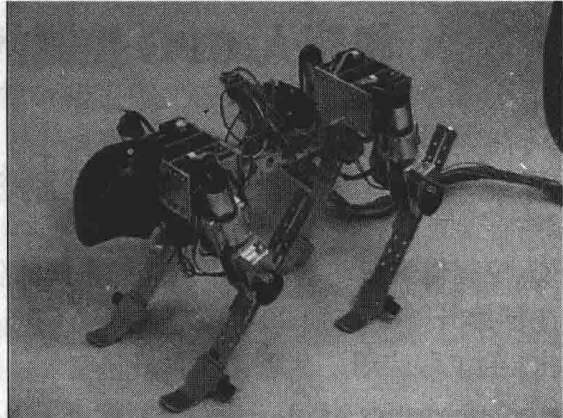
为适应机器人控制的实际需要，日本 H. Kimura 研究组根据机器人控制的需要对 Matsuoka 振荡器模型进行了改进，解除了 Matsuoka 振荡器只能输出正值信号的制约<sup>[68]</sup>。Kimura 和同事将改进的 CPG 模型成功应用于四足行走机器人控制，并对 CPG 控制产生多种运动模式以及存在的问题进行了深入研究<sup>[69~72]</sup>。此外，他们还研究了在运动控制中集成传感反馈的不同方法，并发现传感反馈会调节 CPG 行



为，使机器人能在复杂的地形上获得非常稳定的运动。如图 1.1 所示为 Kimura 研究组研制的四足机器人图片。



(a) 机器人 Patrush



(b) 机器人 Tekken

图 1.1 基于 Kimura 模型的四足机器人

1998 年, Taga 提出了描述人类运动的神经元-肌肉-骨骼的神经力学模型, 并将其用于两足避障运动仿真<sup>[73,74]</sup>。由于 Taga 在神经力学仿真方面的开创性工作, CPG 模型被越来越多地应用于仿人机器人的两足运动控制上, 如 Aoi 和 Tsuchiya 针对一个由髋部、腿和旋转关节组成的双足步行机器人建立了双足行走模型, 并采用 Poincaré 映射图分析了模型长期全局行为以及分岔等情况, 在此基础上, 成功地将其应用于双足机器人的直行、转弯以及二者之间的切换等运动模式中<sup>[75,76]</sup>; Nakashimi 等为双足机器人建立了基于非线性振荡器的 CPG 控制方法, 并通过学习使双足机器人获得了自然的类人运动模式<sup>[77]</sup>。其他的双足行走机器人和仿人机器人的 CPG 控制方法通常是建立在非线性振荡器的基础上, 多数是受生物运动 CPG 控制的启发, 尤其是参考人类行走步态和运动模式<sup>[78~87]</sup>。

除了双足机器人, CPG 控制模型也广泛应用于多足机器人, 如四足机器人<sup>[40,68,88~94]</sup>、六足机器人<sup>[95~98]</sup>、八足机器人<sup>[99]</sup>等。这些足式机器人的 CPG 运动控制模型多数受昆虫或低级脊髓动物的启发, 模仿生物的 CPG 特性构建了仿生机器人的运动控制器, 从而为机器人提供多模态鲁棒的运动。

CPG 用于两栖机器人的运动控制具有特殊的意义, 因为它不仅可以解释生物不同运动环境中运动的切换机制, 而且有助于深入探索两栖生物运动控制的神经生物学机理。Fjerdingen 等针对装有三维视觉和力觉传感器阵列的蛇形机器人, 设计了 CPG 控制器, 并实现了蛇形机器人的蜿蜒运动<sup>[100]</sup>, 其实验样机如图 1.2 (a) 所示; Inoue 等人利用 CPG 模型实现了蛇形机器人的二维平面运动<sup>[101]</sup>; Crespi 和其同事设计了两栖蛇形机器人, 并采用 CPG 来产生驱动信号, 实现了两栖蛇形机器人在陆地和水中的运动控制<sup>[102~104]</sup>, 其蛇形机器人样机如图 1.2 (b) 所示。