

文章编号: 1002-0446(2007)06-0601-08

# 两栖仿生机器人研究综述\*

杨清海, 喻俊志, 谭民, 王硕

(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)

摘要: 概述了两栖仿生机器人的发展过程, 主要从腿式和蛇形两方面介绍了国内外两栖机器人的研究现状, 分析了两栖机器人研究目前存在的一些难点问题, 并展望了两栖机器人的未来发展。

关键词: 两栖仿生机器人; 腿式机器人; 蛇形机器人

中图分类号: TP24 文献标识码: A

## Amphibious Biomimetic Robots: A Review

YANG Qinghai YU Junzhi TAN Min WANG Shuo

(Laboratory of Complex Systems and Intelligence Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: This paper surveys the development process of amphibious biomimetic robots and mainly describes the current R&D status of amphibious robots at home and abroad in terms of legged and snake-like amphibious robots. Meanwhile, the difficulties to be solved under development are analyzed and the future of amphibious robots is forecasted.

Keywords: amphibious biomimetic robot; legged robot; snake-like robot

### 1 引言 (Introduction)

两栖动物作为最原始的陆生脊椎动物, 经历了漫长的自然选择, 是脊椎动物进化史上由水生到陆生的过渡类型<sup>[1]</sup>, 既有从鱼类祖先继承下来的适应水生生活的性状, 又有适应陆地生活的新性状。在地球上, 除了南极和格陵兰岛以外, 其它任何地区都有两栖动物, 因此具有很强的环境适应能力。

近年来, 计算机系统的发展推动了机器人技术的进步, 机器人的种类不断增加, 除了主要用于制造业的工业机器人外, 还出现了应用于航天(如美国的勇气号和机遇号火星车)、航海(如深海作业机器人)、医疗护理(如手术机器人)、服务(如机器人保姆)、军事(如排雷机器人)等领域的机器人。但是, 大多数机器人只能在单一环境下活动, 例如陆地移动机器人由于没有水中推进机构或不具备防水功能, 不能进行水下活动, 而水下机器人大多不具备或没有足够的陆地运动能力。受两栖类动物的启发, 人们对既能适应陆地和近海滩涂的多变地形, 又能适应复杂水环境的两栖机器人产生了浓厚的兴趣, 自然

界中具有良好两栖适应性的蟹、龟、蛙、鳄鱼、企鹅、蝾螈等动物为两栖机器人设计提供了生物原型。目前, 国内外对于水陆两栖机器人的研究尚处于起步阶段, 和其它类型的机器人相比, 研究成果相对较少。

两栖动物经过几百万年的发展, 能够在复杂多变的环境中生存下来, 说明每种两栖动物都拥有独特的特征与功能。因此, 在现有机器人的研究基础上, 通过研究、学习、模仿来复制和再造两栖动物的生物特征、结构、功能、工作原理和控制机制等, 能极大地促进研究人员对两栖动物的理解, 推动两栖机器人的研究<sup>[2]</sup>。然而, 模仿生物体并不是一件容易的事情, 特别是在模仿整个生物体时, 会遇到机构建模、机械设计、信息感知、控制等诸多问题, 因此, 许多研究者采用了部分仿生的设计方法, 例如机器人本体的某一部分采用仿生设计, 或一定程度上模仿仿生对象, 或采用运动仿生、控制仿生等手段。

根据运动方式不同, 目前的两栖机器人大致可以分为两类: 腿式两栖机器人和蛇形两栖机器人。

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60635010 50475179 60505015)。

收稿日期: 2007-02-01

## 2 腿式两栖机器人 (Legged amphibious robots)

不规则和不平坦的地形是水陆环境的一个主要特点,为了适应多变的地形,一些两栖机器人采用了具有良好地形适应能力的腿式运动方式.为了克服腿式运动机械结构和控制算法复杂的缺点,还有一些采用了改进的腿式结构.下面根据腿式两栖机器人仿生对象的不同分别加以介绍.

### 2.1 仿蟑螂

蟑螂出色的运动能力给机器人设计提供了灵感,其运动原理主要有以下几点<sup>[3]</sup>: 1)六条腿支撑、移动身体; 2)行走、跑动时采用三角步态,身体一侧前后两条腿与另一侧中间一条腿的步态保持协调; 3)行走时前腿摆动到和头部相同的高度,这样不用改变步态就可以越过一般障碍物,但遇到较大障碍物时,要改变步态; 4)通过身体一侧产生不对称的腿部运动进行转弯; 5)通过改变身体姿态提高越障能力; 6)当翻越高于头部的障碍时,利用中间两条腿将身体抬起,使前腿能达到更高的高度; 7)越障时,通过身体弯曲使前部放低,避免重心过高.

美国凯斯西储大学 (CWRU)和美国海军研究院 (NPS)的研究人员充分了解了蟑螂的运动特点之后,提出了一种具有全地形适应性的仿蟑螂两栖机器人设计方案,称作“Whegs IV”<sup>[3,4]</sup>. Whegs IV采用简化的三辐轮腿机构实现蟑螂腿的功能,每个轮腿机构都采用柔性机构设计,相邻两腿之间有 $60^\circ$ 的相位差,这样, Whegs IV在陆地或水底正常行进时可实现三角步态,越障时轮腿机构被动地由不同步变为同步,提高越障能力.轮腿机构的轮辐采用传统螺旋状设计,旋转时推动 Whegs IV在水下运动,并通过体关节的正负转动实现机器人上升和下潜.

目前, Whegs的陆上版本能够灵活地进行跑动、转弯、避障、越障等,具有良好的地形适应性和稳定性,图 1为 Whegs II在翻越障碍.

### 2.2 仿龙虾

滨海、滩涂地区对于生物来说是具有挑战性的环境,强湍流、潮汐、乱流等会带来严重的稳定性问题,而如何处理湍流以及控制动力也是陆地行走和水底行走的一个基本差别.龙虾 (lobster)作为一种在海底生活了数百万年的生物,已经进化出了一套完美的系统来进行感知、搜索、运动控制和湍流处理.运动时,龙虾和小龙虾 (crayfish)用爪、腹部和游水足进行水动力控制,以缓解水的扰动带来的影响.

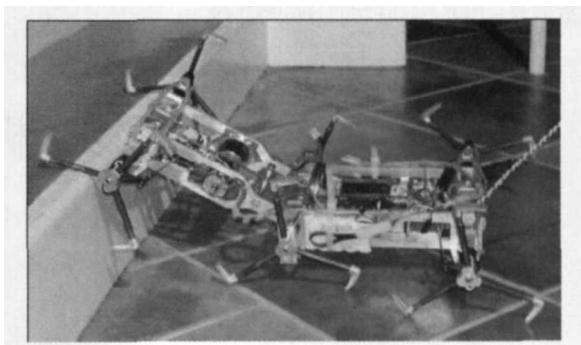


图 1 Whegs II抬起一半身体

Fig 1 Whegs II rearing half of its body

1998年至今,美国东北大学海洋科学中心的 Ayer基于龙虾和小龙虾的神经控制研究成果相继开发了3代机器龙虾 (Lobster robot)<sup>[5,6]</sup>,如图 2所示,其潜在应用是在有海浪和海流的浅水区域进行自主排雷作业和侦探任务.机器龙虾采用8条三自由度的腿推进,每条腿采用以镍钛诺合金为材料的人工肌肉为驱动器,并采用基于神经元电路的控制器来实现机器龙虾的各种行为.

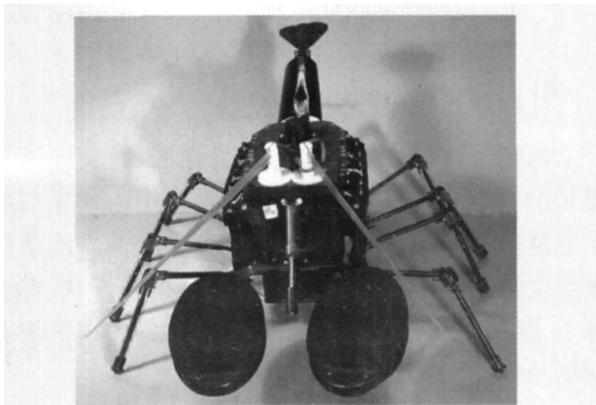


图 2 机器龙虾

Fig 2 The lobster-based robot prototype

与此同时,布鲁克林大学 (Brooklyn College)的神经生物学家 Grasso针对龙虾在海洋湍流环境下具有敏锐的嗅觉功能这一特点构建了自主水下机器人: Robolobster 和 Robolobster II<sup>[7,8]</sup>,探索龙虾的嗅觉跟踪机理及应用.但由于 Grasso的主要研究目的是为了揭示龙虾在湍流中如何敏锐地发现气味来源的机理,因此 Robolobster只是在命名上和龙虾相似,其运动机构和传感系统只是用来验证他们所提出的关于龙虾嗅觉的设想,和实际龙虾并不相似.

### 2.3 仿螃蟹、龟

水雷对于海军来讲无疑是一种巨大的威胁.由

于浅水区水雷数量大、传统扫雷车无法作业、乱流和泡沫影响探测等等原因,水雷探测在这种区域变得更加困难.为了解决这一问题,IS Robotics和 Rockwell International于 1996 年推出了一种六腿仿螃蟹机器人,名为 ALUV (Autonomous Legged Underwater Vehicle)<sup>[9]</sup>.ALUV 的研制分两阶段进行,第一阶段研制的 Ursula 样机安装了 6 条二自由度的单段腿,每条腿可以独立地上下、前后移动,因此能进行多种步态行走,Ursula 验证了多足爬行机构及探雷装置的可行性;第二阶段改进版的 Arie 采用两段式腿部设计,每条腿的两段可以独立旋转,且旋转轴共面,因此其行走步态和实际螃蟹的“横行”步态相同,由于两腿旋转幅度分别为  $\pm 90^\circ$  和  $\pm 135^\circ$ ,所以当 Arie 完全翻转时也可正常行走.和 Ursula 相比,Arie 提高了行走速度和地形适应能力.图 3 为 Ursula 探测水雷的场景.

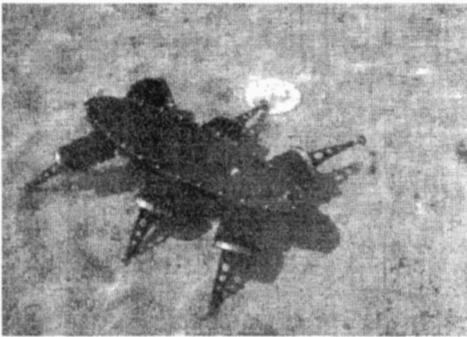


图 3 Ursula 探测水雷

Fig 3 The Ursula ALUV detecting a mine

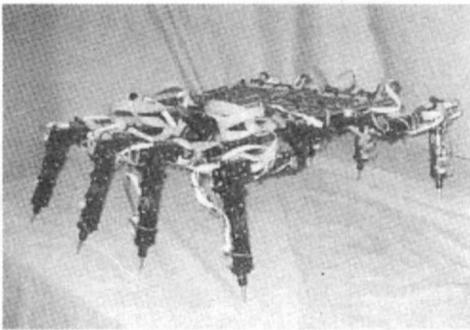


图 4 仿生机器蟹在实验中

Fig 4 A crab-like robot prototype in experiment

国内,哈尔滨工程大学机电工程学院的研究人员在众多种类的螃蟹中选择河蟹作为生物原型,进行了充分的观察和研究,研制了一种两栖仿生机器蟹,如图 4 所示<sup>[10]</sup>.实验证明,仿生蟹能够按照双四足步态在平坦的地面上实现前进、后退、横行、左右

转弯等动作,横行时最大运动速度约  $0.2 \text{ m/s}$ ,前后行走时最大为  $0.1 \text{ m/s}$  并可以跨越高  $30 \text{ mm}$  的障碍<sup>[11]</sup>.在水中运动时,将机器蟹整体放入根据其外形定制的柔性皮套内,即采用整体包裹的防水方式.

Nekton Research 公司的 Mathieu MBAR 的 Hobson 以及 Vassar College 的 Long 等人研制了一种两栖机器人装置<sup>[12]</sup>,名为 Madeleine<sup>[13]</sup>,外界称之为“机器龟 (robot turtle)”,如图 5 所示. Madeleine 的尺寸为  $60 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ ,身体干燥时重  $20 \text{ kg}$ ,身体两侧各有两个平行的鳍作为驱动装置.机器人采用  $70 \text{ W}$  的 Maxon 有刷电机,游动时功率密度为  $5 \text{ W/kg}$ ,突然动作时可达  $10 \text{ W/kg}$  高功率密度使其具有了可以和动物媲美的灵活性,而且能在海底和海滩爬行. Long 等还进一步利用 Madeleine 探讨了四鳍和二鳍驱动的优劣<sup>[14]</sup>.

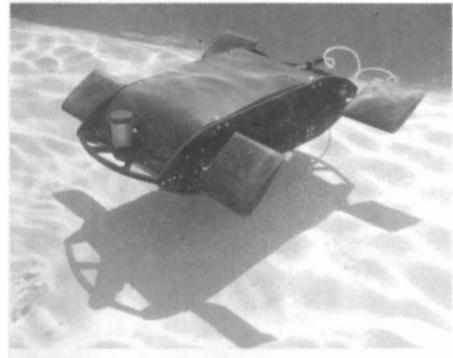


图 5 机器龟 Madeleine

Fig 5 Robotic turtle Madeleine

上海交通大学机器人研究所的研究人员通过对生态龟的生活习性、结构特点、运动方式的观察与研究,在一种乌龟爬行玩具的基础上,提出了一种四足两栖机器龟,使其具有生态龟的结构形式和运动形式,能够在水中游动和在陆上爬行<sup>[15]</sup>.机器龟的具体设计方案已经申请国家专利<sup>[16]</sup>.

#### 2.4 其它轮腿式两栖机器人

为了能使腿式机器人在野外崎岖不平的地形和恶劣的实际环境下工作,在美国国防高级研究计划局 (DARPA) 的资助下,加拿大麦吉尔大学、密歇根大学、加州大学伯克利分校、卡内基梅隆大学等机构于 1999 至 2004 年间联合研制了一系列腿式机器人,名为 RHex. 经过几年的发展,RHex 不断完善和提高,共研制出 3 种版本,如图 6 所示,从左至右分别为: Research-RHex、Shell-RHex 和 Rugged-RHex<sup>[17]</sup>. 由于设计要求和工作环境不同,3 个版本的 RHex 各具特点,除 Research-RHex 之外其它两个版本的 RHex

都具有防水能力,其中 Rugged-RHex的防水性能通过了水下 5 米测试,不做任何改动即可在陆地和水面活动,因此也可称为两栖机器人.



图 6 RHex系列腿式机器人

Fig 6 A series of legged robots named RHex

在 RHex系列陆地机器人的基础上,麦吉尔大学又联合约克大学、戴尔豪斯大学等研制了一种两栖机器人 AQUA<sup>[18]</sup>,长宽高为 65 cm×50 cm×13 cm,重 18 kg,实测下潜深度 14 m,此深度游动速度 0.4 m/s,如图 7所示.游动时,AQUA利用 6个桨的拍动控制自身速度和姿态;在陆地活动时,AQUA把桨用作腿走动.由于每个桨单独控制,因此对其参数进行设置,不仅可以直接控制机器人在水中 6个自由度中的 5个,分别为:纵荡 (surge)、升沉 (heave)、纵摇 (Pitch)、横摇 (roll)和首摇 (yaw),还可以在行走时产生一系列不同的步态,如图 8所示.从 2004年起,AQUA作为一个跨国联合研究项目在加拿大近海沙滩和珊瑚礁海域进行了 3次实地试验<sup>[19]</sup>,其目的是为了验证与水下图像理解、水下特征识别、基于视觉和声学特征的 3D场景建模、运动控制及机械设计相关的理论与技术,以期 AQUA在近海及沿岸的环境监测、生物保护及辅助潜水员工作等方面尽快走向应用.



图 7 AQUA 两栖机器人平台

Fig.7 An amphibious robotic platform named AQUA

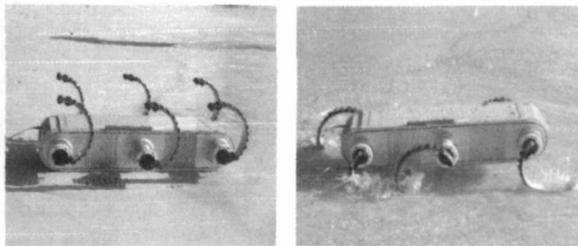


图 8 AQUA 行走步态

Fig.8 Walking gait of AQUA

另外,美国福斯特-米勒 (Foster-Miller)公司还研制了一种使用履带推进的遥控型两栖小型机器人<sup>[20]</sup>,可自由出入拍岸浪区和沙滩,完成大面积的探雷、排雷作业等.

### 3 蛇形两栖机器人 (Snake-like amphibious robots)

生物蛇遍布于整个地球,其多种运动形式及生理特点使它能够适应广泛的地理和自然环境.蛇形机器人也是仿生机器人家族中的一员,具有生物蛇的运动机理和行为方式,能在各种粗糙、陡峭、崎岖复杂的地形上行走,并可攀爬障碍物,因此在许多领域具有非常广泛的应用前景,如在有辐射、有粉尘、有毒的环境及战场环境执行侦察任务;在地震、塌方及火灾后的废墟中找寻伤员;在狭小和危险的环境条件下探测和疏通管道;为人们在实验室里研究数学、力学、控制理论和人工智能等提供实验平台等等.

实验表明,蛇靠身体的变形与地面作用产生驱动力.蛇的典型运动方式主要有 4种<sup>[21]</sup>: 1 蜿蜒运动 (lateral undulation),借助身体侧面接触凹凸不平的地面所产生的力前进,身体各部分形成相似的 S形运动轨迹,是最普通、最高效的一种运动方式,几乎所有蛇类都能用这种方式运动; 2 伸缩运动 (concertina motion),身体收缩成 S形,前部前伸,后部收缩,循环向前运动,类似手风琴的收缩与伸张.当运动空

间狭小或者地面摩擦系数不满足蜿蜒运动要求时采用伸缩运动, 但运动效率低; 3) 侧向移动 (sidewinding), 从头部开始, 身体部分顺次接地、抬起, 完成前进运动, 身体和地面只有很少的接触点. 在沙地环境中运行时, 滑动摩擦阻力小, 因而运动效率高, 是一种很好的适应沙漠环境的运动形式; 4) 直线运动 (rectilinear locomotion), 靠腹部和地面的摩擦力进行驱动, 部分点与点之间有相对运动, 适于笨重的蛇类运动. 蛇的其它运动形式还有跳跃、绕身体脊椎的回转、利用障碍物推动身体运动、蠕虫运动、滑行冲击等.

当蛇类用第一种运动方式在水中游动时, 称为鳗状游动, 一些长体鱼类如鳗鲡和七鳃鳗就采用这种游动方式. 虽然大多数蛇形机器人都采用蜿蜒运动的方式, 但大都只能在陆地活动, 能游动的蛇形机器人非常少, 即使有的机器人能在水中游动, 其陆地运动能力也非常有限, 例如日本东京工业大学机器人实验室的 HELIX<sup>[22]</sup>. 为了进一步拓展蛇形机器人的应用范围, 东京工业大学机器人实验室在水下蛇形机器人 HELIX 的基础上, 研制了一种两栖蛇形机器人 ACM-R5<sup>[23]</sup>, 它不仅能在陆地爬行, 还能在水中游动, 如图 9、10 所示.

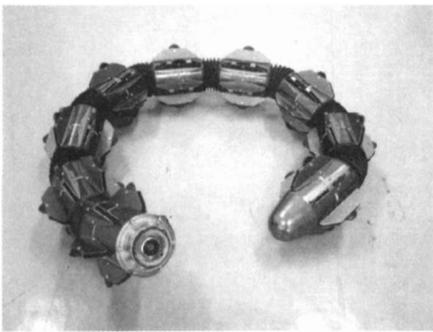


图 9 ACM-R5 在陆地  
Fig. 9 ACM-R5 on ground



图 10 ACM-R5 在水中  
Fig. 10 ACM-R5 in water

ACM-R5 由一系列关节组成, 每个关节有两个自由度, 为了使关节防水, 每个关节都由伸缩膜覆盖, 关节连接处用 O 型圈密封, 具体机械结构如图 11 所示.

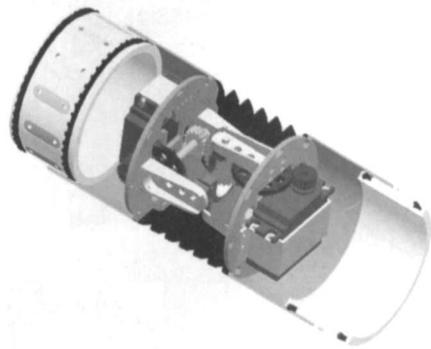


图 11 ACM-R5 关节结构  
Fig. 11 Joint structure of ACM-R5

为了进行水陆两栖活动, ACM-R5 的每个关节安装了 6 个采用了特殊设计的推进机构, 称之为“鳍”, 兼有被动轮和桨的作用, 如图 12 所示. 机器蛇在地面进行侧面波状运动时, 机器蛇和地面的摩擦系数要有方向性, 即运动路线切线方向的摩擦系数要小于垂直方向的摩擦系数, 采用被动轮可满足机器蛇对于摩擦系数的要求, 实现蜿蜒运动; 另一方面, 水蛇之所以能在水中游动, 也是由于轴向和纵向水阻力存在差异, 虽然 ACM-R5 的细长体设计本身能满足水阻力差异, 但加上桨之后可以增大阻力差, 提高游动效率.



图 12 ACM-R5 的鳍 (带有被动轮桨)  
Fig. 12 Fin of ACM-R5 (Paddle with passive wheel)

ACM-R5 采用模块化设计, 所有关节具有相同的结构, 并通过 CAN 总线通信, 这种模块化的设计不仅节约了设计和加工成本, 而且当有关节出现故障时, 只需用另一个关节替换故障关节即可, 大大方便了机器人的维护. 到目前为止, ACM-R5 还在进一步完善和提高当中, 其运动速度和下潜深度等参数还未进行精确测定.

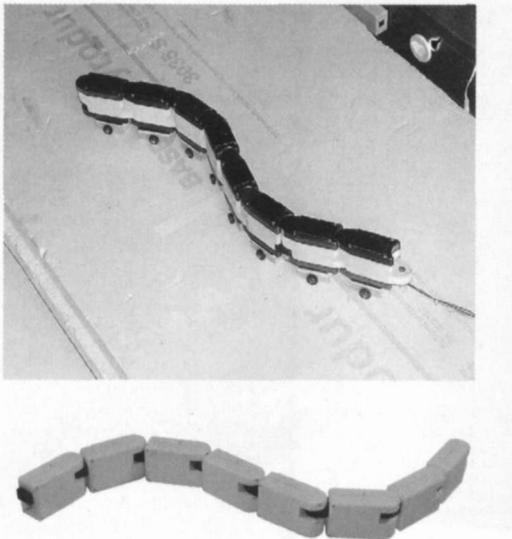


图 13 AmPhBot 和 AmPhBot II  
 F 图 13 AmPhBot I and AmPhBot II

为了设计一种能在陆地爬行、水中游动的全新的两栖蛇形机器人,并在此机器人上展示利用 CFG (Central Pattern Generator, 中枢模式发生器) 进行运动参数在线优化的强大功能,瑞士联邦工学院的 CresP 研制了两个版本的蛇形机器人: AmPhBot I<sup>[24]</sup> 和 AmPhBot II<sup>[25]</sup>,如图 13 所示.和 AmPhBot 相比, AmPhBot II 在机械设计、动力性能、无线通信能力、防水性、在线 CFG 等一系列方面都得到了改进,并分别在陆地和水中进行了测试.和 ACM-R5 相比, AmPhBot 虽然也采用了模块化的设计方法,但由于每个关节只有一个旋转自由度,因此不能实现爬行和游动中的三维运动.

国内中科院沈阳自动化研究所和国防科技大学等单位也对蛇形机器人进行了深入研究,研制了不同类型的机器人样机<sup>[26]</sup>,探索了蛇形机器人的控制方法<sup>[27]</sup>.虽然这些蛇形机器人是为陆地运动设计,但是经过防水处理后,也可实现水陆两栖运动功能.

作为两种不同的驱动方式,腿式和蛇形机器人各有其优缺点:

1) 两栖运动能力.传统的腿式机器人必须和地面接触才能推动自身前进,因此只能在地面和水底运动,不能称为真正意义上的两栖运动,要使其具有游动能力,必须改进腿部机构的机械设计和运动方式;而蛇形两栖机器人如果每个关节只有一个自由度,也只能进行平面运动,要使其具有三维运动能力,每个关节至少应有两个自由度,这就增加了物理实现上的难度.

2) 实际环境适应能力.蛇形两栖机器人在野外

恶劣的实际环境中工作时,由于整个身体和地面接触,可能大大增加摩擦力,甚至使身体陷入泥泞的地面中,而且,为了满足摩擦力要求,很多蛇形机器人通过被动轮和地面接触,实际环境中的泥泞、荒草、树枝等不确定因素可能使被动轮的作用降低,甚至失效,严重影响其运动能力.而腿式两栖机器人的身体和地面是分离的,机器人的身体可以平稳地运动而不必考虑地面的粗糙、泥泞程度以及腿的放置位置,实地测试也表明其能在恶劣环境中生存,如 Rhex 系列机器人.目前来讲,改进型的腿式两栖机器人比蛇形两栖机器人具有更好的实际环境适应能力.

3) 应用范围和维护.为了使腿部协调、稳定运动,腿式机构的机械设计往往比较复杂,其体积和重量也很大,不能应用在空间狭小的场合,限制了应用范围.当腿式机器人内部出现故障时,往往需要整体拆装来查找故障原因,不利于维护,但目前已经有腿式两栖机器人开始考虑模块化设计的问题,如 Rugged RHex 蛇形两栖机器人由于其特有的细长体结构,可以在狭小空间内自由活动,且采用模块化设计的蛇形两栖机器人,可以根据不同工作的需求,利用不同数量的模块进行组合,增强空间适应性.当某一模块发生故障时,只需用新的模块替换即可,具有很高的可维护性.

#### 4 难点问题 (Difficulties)

综上所述可以看出,国内外关于两栖机器人的研究多集中于推进机构的探索性研究,虽然取得了一定的进展,但实际性能比如速度、机动性、地形适应性等相对较差,两栖活动能力不能同时得到保障.要研制出能满足实际应用要求的两栖机器人,有以下几个主要难点问题需要克服:

1) 水陆两栖复合推进系统建模.生物体在亿万年的进化历程中已经获得了精细的肌体结构和巧妙的神经控制来与环境相适应,两栖机器人要具有像两栖动物一样的灵活性和适应性,那么其运动学和动力学模型必定与常规机器人有较大差别.系统建模时,应将仿生原型的形态参数和运动参数与实际机电系统的物理约束相结合,在满足实际应用需求的基础上尽量简化推进模型,实现机构的可控性.

2) 两栖复合推进机构设计与实现.机器人在陆地和水中的推进方式有很多种,其运动原理各不相同,且各具优缺点,如轮式推进结构简单、控制方便,但地形适应能力差;腿式行走虽有较好的地形适应性,结构和控制却相对复杂;拍动方式在水中效率

高,但不能应用于陆地移动.考虑到机器人空间大小、运动控制的复杂程度以及稳定性等因素,在设计两栖机器人推进机构时,应尽量避免在水陆环境中分别使用两套不同的推进机构,而应该采用适用于水、陆两种环境的复合推进机构,通过采用复合机构的不同运动形式和控制方法实现水中和陆地推进.

3)两栖复合推进机构的运动控制与优化.两栖动物之所以具有卓越的运动能力,不仅在于它们具有灵巧的身体结构,更重要的是其能够根据周边环境、自身状态以及运动要求等,产生各种运动模式下最优的控制参数,使各个身体机构完美地协调和配合,因此,必须在两栖机器人系统模型的基础上,探索有效且容易实现的运动控制和优化方法,如能产生节律运动的 CPG 等方法,实现两栖机器人直行推进、上升下潜、转弯、避障等运动模式的控制,并通过对在线参数调整克服两栖环境诸多干扰和不确定因素等对机器人运动的不利影响.

4)水陆运动模式自主切换机制.两栖机器人活动时,水陆两种环境必然会频繁切换,这就要求其运动模式频繁切换,模式切换看似简单,但却非常重要,因为水中和陆上环境不同,机器人运动步态也不相同,当环境变化时,步态要在一瞬间完全变化<sup>[28]</sup>,而且要不不停地适应新的环境.当采用复合推进机构时,步态的变化意味着从一组控制参数切换到另一组参数,但是如果直接切换控制参数,有可能引起机器人运动机构的剧烈振荡,破坏机器人的稳定性,因此,要有“中间”控制参数,保证步态切换平稳进行,机器人从某一运动模式快速、平滑地切换到另一运动模式.但是,由于步态切换时运动机构所处的状态并不确定,中间参数不能预先设定,因此要求机器人的控制方法能“在线”自动产生中间参数.

5)信息感知与融合.两栖动物能在水陆环境自由地活动,一定程度上在于其具有丰富的感官来感知外界环境及自身信息,并将多种信息进行融合,对应采取的运动模式做出相应的判断和决策,对运动参数做出调整.同样,为了实现两栖机器人自主或半自主控制,机器人必须具备一些基本的功能,如温度监测、障碍物探测、水中深度测量;为了进一步实现智能控制,还应具有速度、倾角、位置、障碍物距离等信息的探测功能.

6)原型系统设计与开发.要设计两栖机器人,必然要解决防水问题,目前,两栖和水中机器人采用的防水方式主要有两种:机构密封和包裹密封.包裹密封是指将机器人整体或部分机构装入柔软的橡胶

(或其它类似材料)制“外套”内,接口处粘合密封,虽然这种防水方式简单易行,但是对于在水中具有三维运动能力的两栖机器人来说,下潜到一定深度后,由于水下压力的增大,可能使机器人的柔性“外套”发生畸变,导致机器人体积变化,引起浮力减小和身体配重的失衡,进而影响机器人在水下的活动能力;机构密封通过机构自身的防水机械设计,辅以“O”型圈、黏合剂等实现防水,由于各部件均为刚性材料,在水下不存在变形问题.在设计两栖机器人原型系统时,应尽量采用机构密封的方式,或以机构密封为主,少数机构采用包裹密封的方法.

两栖机器人活动范围广,运动模式多,所需的能量消耗也很大,因此需要大容量的机载电源为机器人提供充足的动力,但是电池容量的增大会导致机器人体积和重量的增加,不仅使机构设计更加困难,还会导致能耗增大,因此,电池容量应该既能充分满足运动需求,又不大幅增加能耗负担和机械设计难度,建议机载电源应至少能使机器人运动 1 小时以上.

水下机器人所采用的通讯方式主要为“有缆+无线”的方式,在水下活动时通过电缆和水面中继通讯,中继通过无线方式和控制中心通讯.由于目前水下无线通讯的技术和设备尚未有突破性的进展,因此推荐两栖机器人采用无线(下潜深度小时)或“有缆+无线”(下潜深度大时)的通讯方式.

除上述问题外,工作环境的特殊性还带来了驱动、材料等各种问题,显而易见,如何解决这些技术问题,并将各个功能模块有机地整合在一个合理的框架内,保证系统的稳定、可靠,是突破两栖机器人制约瓶颈的关键.

## 5 结论 (Conclusion)

生物学研究的进展,将会给研究者提供更多关于两栖动物的生理数据,加深人们对两栖动物的认识和理解,帮助人们建立更加简单有效的两栖机器人模型;而材料学、仿生学、控制理论、机械设计与制造以及低成本、低功耗计算系统的发展将促使两栖机器人在速度、稳定性、机动性、地形适应性、工作时间、信息感知与融合等方面的性能不断提高,逐步实现机器人自主化和智能化,使其能够更好地应用于水雷探测、搜索救援、地形测绘、水下生态环境监控等特殊环境和场合.因而,两栖机器人具有广阔的发展和应用前景.

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] 王原, 徐星. 两栖动物进化漫谈[ J]. 大自然, 2002 (2): 3—5
- [ 2 ] 张秀丽, 郑浩峻, 陈息, 等. 机器人仿生学研究综述[ J]. 机器人, 2002 24(2): 188—192
- [ 3 ] Boxenbaum A S, Weik P, Quinn R D, et al. Design of an autonomous amphibious robot for surf zone operation. Part I—mechanical design for multimode mobility[ A]. Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics[ C]. Piscataway NJ USA: IEEE, 2005. 1459—1465
- [ 4 ] Hawkins R, Ward J, Vaidyanathan R, et al. Design of an autonomous amphibious robot for surf zone operations. Part II—hardware control implementation and simulation[ A]. Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics[ C]. Piscataway NJ USA: IEEE, 2005. 1465—1470
- [ 5 ] Ayers J. Underwater walking[ J]. Arthropod Structure & Development 2004 33(3): 347—360.
- [ 6 ] Chambers P. Lobster special[ J]. Mechanical Engineering 2000 122(9): 1—6
- [ 7 ] Hood E. Robotobsters: The beauty of biomimetics[ J]. Environmental Health Perspectives 2004 112(8): A486—A489.
- [ 8 ] Paulson L D. Biomimetic robots[ J]. Computer 2004 37(9): 48—53.
- [ 9 ] Greiner H, Shectman A, Won C, et al. Autonomous legged underwater vehicles for near land warfare[ A]. Proceedings of the IEEE Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology[ C]. Piscataway NJ USA: IEEE, 1996. 41—48.
- [ 10 ] 王立权. 两栖仿生机器蟹模型建立与步行足协调控制技术研究报告[ D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2003
- [ 11 ] 王立权, 孙磊, 陈东良, 等. 仿生机器蟹样机研究[ J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005 26(5): 591—595
- [ 12 ] Hobson B W, Kemp M, Moody R, et al. Amphibious robot devices and related methods[ P]. USA: 6974356, 2005.
- [ 13 ] Kemp M, Hobson B, Long J H. Madeleine: An agile AUV propelled by flexible fins[ A]. Proceedings of the 14th International Symposium on Unmanned Undersea Remotely Operated Technology[ C]. USA: 2005. 1—6
- [ 14 ] Long J H, Schumacher J, Livingston N, et al. Four flippers or two? Tetrapodal swimming with an aquatic robot[ J]. Bioinspiration and Biomimetics 2006 1(1): 20—29.
- [ 15 ] 孙安, 高雪官, 吴斌. 四足两栖仿生机器龟的研究[ J]. 机械, 2004 31(5): 12—13, 16
- [ 16 ] 孙安, 吴斌, 高雪官. 水陆两栖机器龟[ P]. 中国: 200310108109.9, 2004—10—20
- [ 17 ] Prahacs C, Saunders A, Smith M K, et al. Towards legged amphibious mobile robotics[ A]. The inaugural Canadian Design Engineering Network (CDEN) Design Conference[ C]. Montreal, Canada: 2004
- [ 18 ] Georgiades C, Geman A, Hogue A, et al. AQUA: An aquatic walking robot[ A]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[ C]. Piscataway NJ USA: IEEE, 2004. 3525—3531
- [ 19 ] Thiberge M, Dudek G. Gone swim in[ J]. IEEE Spectrum 2006 43(6): 38—43.
- [ 20 ] Foster Miller Corporation. TALON Robots EB/OI. [http://www.fostermiller.com/learning.htm#talon\\_robots](http://www.fostermiller.com/learning.htm#talon_robots) 2007—01—25
- [ 21 ] 陈丽, 王越超, 李斌. 蛇形机器人研究现状与进展[ J]. 机器人, 2002 24(6): 559—563.
- [ 22 ] Takayama T, Hirose S. Amphibious 3D active cord mechanism “HELK” with Helical swimming motion[ A]. Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[ C]. Piscataway NJ USA: IEEE, 2002. 775—780.
- [ 23 ] Yanada H, Chigasaki S, Mori M, et al. Development of amphibious snake-like robot ACM-R5[ A]. Proceedings of 36th International Symposium on Robotics[ C]. Japan: 2005. 433—440
- [ 24 ] Crespi A, Badertscher A, Guignard A, et al. Amphibot I: An amphibious snake-like robot[ J]. Robotics and Autonomous Systems 2005 50(4): 163—175.
- [ 25 ] Crespi A, Ijspeert A J. Amphibot II: An amphibious snake robot that crawls and swims using a central pattern generator[ A]. Proceedings of the 9th International Conference on Climbing and Walking Robots[ C]. Brussels: 2006. 19—27.
- [ 26 ] 李斌, 马书根, 王越超, 等. 一种具有三维运动能力的蛇形机器人的研究[ J]. 机器人, 2004 26(6): 506—509
- [ 27 ] 卢振利, 马书根, 李斌, 等. 基于循环抑制 CPG模型控制的蛇形机器人蜿蜒控制[ J]. 自动化学报, 2006 32(1): 133—139
- [ 28 ] 刘先曙. 水陆两栖机器人[ J]. 科技导报, 2001 2: 46

## 作者简介:

杨清海 (1981-), 男, 博士生. 研究领域: 仿生机器人, 机器人控制.

喻俊志 (1975-), 男, 博士, 副研究员. 研究领域: 仿生机器人, 多机器人系统, 智能信息处理.

谭民 (1962-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师. 研究领域: 先进机器人控制, 仿生机器人, 多机器人协调与控制.