

# 陆上杆机构运动仿生的现状、关键技术及未来发展

戴振东

(南京航空航天大学高新技术研究院仿生结构与材料防护研究所,南京,210016)

**摘要:**从运动仿生的生物学基础、仿生运动体的发展和存在问题、运动仿生的未来发展等几个方面回顾和评述运动仿生面临的问题和发展机遇。分析了四足动物运动的生物学机制和国内外现有仿生机器人发展现状及存在的问题,并预测先进环境感知技术、分布式驱动和智能驱动材料、杆机构机器人与智能控制技术和动物运动规律的研究将是未来运动仿生发展的方向。

**关键词:**运动仿生;智能机器人;智能驱动材料;环境感知

中图分类号:Q811 文献标识码:A 文章编号:1005-2615(2012)05-0621-08

## Biomimetics of Legged Locomotion on Unstructured Multi-Bar Compound: Present Situation, Key Technology and Future Development

Dai Zhendong

(Institute of Bio-inspired Structure and Surface Engineering, Academy of Frontier Science, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** The problems in the development of bionic robots, the biological basis and the future of animal-motion bionics are generally reviewed, and the development opportunities as well as problems to be faced in the animal-motion bionics are discussed. At the same time, it is pointed out that the advanced environment perception technology, the multistep actuator driven by smart material, the multi-bar compound mobile robot and its intelligent control technology, and the research on the law of animal motion will be the developing trend in the future.

**Key words:** animal-motion bionics; intelligence robot; smart driving material; environmental perception

运动是动物的基本特征,动物的运动是其实现扑食逃逸、求偶繁衍等基本生存能力的关键。在百万年的演化和进化中,动物的运动能力——跑、游、跳、飞,均达到了令人类惊叹的地步。另一方面,对运动的控制和实现,也是人类科技发展和技术进步的主要表现之一<sup>[1-2]</sup>。

自古以来,自然界就是人类各种技术思想、工程原理及重大发明的源泉。种类繁多的生物经过长期的进化过程,使它们能适应环境的变化,从而得到生存和发展,获得了实现优异运动能力的核心技

术,如环境感知、冗余信息处理、运动能力多变的机构、节能和分布式驱动等,这些技术不少已经为人们所感悟,并用于人类所创造的运动系统。相传早在大禹时期,中国古代劳动人民观察鱼在水中用尾巴的摇摆而游动、转弯,他们就在船尾上架置木桨。通过反复的观察、模仿和实践,逐渐改成橹和舵,增加了船的动力,掌握了使船转弯的手段。同样的技术发明在四大文明古国均有历史记录或者考古发现。因此,可以说仿生的历史一直蕴含在人类的文明进化的过程中。

**基金项目:**国家自然科学基金重大国际合作(61161120325)资助项目;国家自然科学基金(90916021)资助项目;国防基础预研基金资助项目。

**修订日期:**2012-07-28

**通讯作者:**戴振东,男,教授,博士生导师,E-mail:zddai@nuaa.edu.cn。

飞行一直是人类所追求的梦想,飞行技术的发展和进步,是仿生学成功的典范。16世纪初,意大利人达芬奇及其助手对鸟类进行仔细的解剖,研究鸟的身体结构并认真观察鸟类的飞行,设计和制造了一架扑翼机。1891年,德国的工程师Lilienthal成功地进行了可重复的滑翔飞行。莱特兄弟发明带动力的飞行器,改变了人类运动的方式。两次世界大战的军事需求,促进了飞行仿生技术的发展,在世界大战期间和战后几十年来,飞机的机翼形状、机身外形、抗疲劳和稳定性设计等方面的设计进步,几乎都受到动物飞行翼、动物外形和结构特征的启发。

20世纪90年代初,各国都在为发展“仿生”相关交叉学科的基础研究作了精心长期的计划准备。美国在DARPA,NSF,空军和海军等项目支持下,发展了一系列的高端仿生技术,如脑机接口技术、智能机器人技术、动物的运动控制等领域,同时还优先发展先进制造、先进材料、先进军事装备研究的长期计划;德国在DFG,BMBF等项目支持下,在仿生电子技术、纳米技术、富勒碳材料、光子学、仿生材料、生物传感器等领域投入了大量财力和人力。前苏联和俄罗斯一直把仿生作为主要的原创技术来源,其独特的对地观测系统源于昆虫复眼研究的结果,Frantsevich院士为此获得列宁勋章。英国、日本以及韩国等国都有相应的中长期计划,在先进制造、材料、生物技术、高性能计算与通信计划等领域开展基础性研究。这是一场在仿生科学技术研究领域内展开源头研究的全球性竞争,以便在21世纪的世界市场上占有主动地位。

国内20世纪50年代,以中科院生物物理所为核心,曾结合国家的安全目标,形成一个研究的小高潮,后因文革中断<sup>[3]</sup>。2000年前,仿生研究还比较零散,主要代表包括吉林大学的任露泉<sup>[4-5]</sup>、金属研究所的周本廉<sup>[6]</sup>等。近年来国内仿生学研究发展迅猛,主要研究集中在材料、表面、运动等领域,形成群雄并起的局面。

在仿生的诸多领域中,运动仿生受到人们的格外重视。国内2003年10月第214次香山科学会议的主题是“飞行和游动的生物力学与仿生技术”,同年12月第220次香山科学会议的主题是“仿生学的科学意义与前沿”。路甬祥<sup>[7]</sup>、童秉纲等9位中国科学院和中国工程院院士对中国仿生科学与工程的发展寄予殷切的期望。会后,国内的仿生研究进展很快,已经建立了不少以“仿生”为主题的研究机构。特别是运动仿生和智能机器人技术相结合,在

国内形成了很好的研究氛围。研究涉及四足机器人、仿鱼机器人、仿人机器人、仿壁虎机器人、仿蝴蝶和仿鸟机器人、仿蟹机器人、仿蛇机器人等,国内从事自动化、机械电子、信息技术等领域的学者纷纷从不同的角度开展研究,形成了运动仿生和机器人研究的高潮。

在当前国家面临的特殊国际环境下,发展军用运动仿生对于形成非对称抗衡能力,促进科学的发展和技术的源头创新,是一个重要的选择。

本文从运动的生物学基础、仿生运动体的发展和存在问题及运动仿生的未来发展几个方面回顾和评述运动仿生面临的问题和发展机遇。

## 1 运动仿生的生物学基础

动物运动所处的环境分为水中、空中和陆地上。部分动物具有海、陆、空空间的运动能力,如东方龙虱,它可在水中游,在地上跑,还可在空中飞,这类动物的驱动和运动机构相当复杂,并存在运动驱动和机构切换的行为。

动物在不同的环境中运动,所面临的关键问题是不同的。在水中,主要问题是水对动物运动的阻力,不少海洋动物演化获得了出色的降低阻力的体表质构(微结构、材料和拓扑分布)。在空中,面临的主要问题是产生足够的升力平衡身体自重。因此,这类动物进化了轻质身体结构、高效驱动肌群、精巧的空气动力感知和控制技术。在陆上,动物形式多样,行为复杂,运动所面临的关键问题为克服自身的重力的同时适应陆地复杂多变的形态和环境。这种环境下,动物进化出了3种基本的运动模式——腿结构运动机构、无腿运动机构和滚动运动。

滚动运动:一般认为,轮子的发明和对滚动运动的利用是人类创造力的典型代表,事实上不少动物也利用滚动实现逃逸。活板门蛛在遇到猎蛛蜂攻击时,会把腿上的5个关节迅速收拢,8条腿将身体围成圈,身体会像轮子一样从沙丘上滚下。这个“车轮”每秒钟转动40多转,滚出2 m远,时速可达40 km/h<sup>[8]</sup>。

无腿运动模式:自然界中以蛇为代表的无腿运动具有很好的环境适应性,蛇不仅能够在地、草丛、树木等复杂表面上运动,甚至可以在水中游动。近十年来国内外不少团队从事蛇运动仿生的研究,取得了一批不错的成绩,但总体而言,仿蛇机器人的运动能力还远远落后于蛇本身的运动能力。

腿式运动机构是陆上动物运动机构的首选。从速度最高的猎豹、运动最灵活的羚羊、体重最大的

大象,到挖洞而居的老鼠,均采用腿足机构为运动机构。按照机构的结构形式,腿足机构可分为直立运动机构和匍匐运动机构。按照腿足的数量,可分为四足、六足、八足和多足。按照所能够运动的表面的能力,或者脚底能否产生粘附性接触,可分为粘附动物和非粘附动物。粘附动物的脚底能够对所在运动表面产生粘附力,从而克服重力,是动物具有在垂直表面或者负表面(如天花板)上的运动能力。

图1对比了不同环境中运动所需要消耗的能量<sup>[2]</sup>。出乎预料的是,同样质量下,游动所要消耗的能量最低,跑步消耗的能量最多。

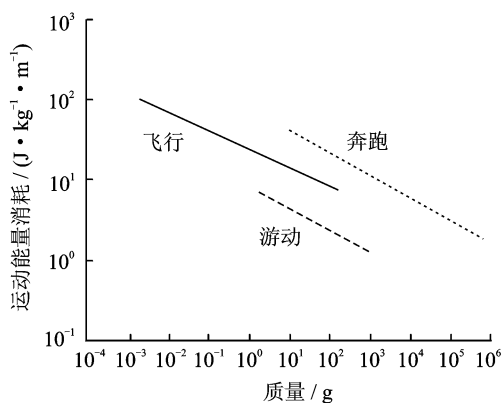


图1 不同环境下动物运动的耗能对比

生物体的运动是神经系统、肌肉系统和骨骼系统协同工作的结果。神经系统控制肌肉系统,产生对骨骼系统的作用力,以完成各种机械动作。

其中神经系统即包含动物体内对运动行为的控制系统,也包含对环境的感知、多信息融合的决策系统。图2是运动相关神经系统的层次结构与相互关系<sup>[9]</sup>。

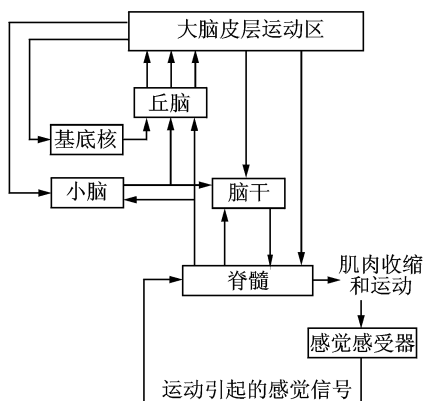


图2 运动系统层次结构与相互关系

在神经系统中,大脑皮层还将整合来自视觉、听觉、嗅觉、方位觉等方面的信息,并结合身体内部

的需求信息,例如饥饿感、求偶需求等,经信息整合,作出综合决策,确定干什么、往哪个方向等顶层任务。脊髓及外周神经信息和肌肉组成了运动的低级和基础单元,该部分常称为CPG层。很多基本的运动模式是在该层储存、记忆和调用执行的。Ijspeert对动物和机器人的CPG做了很好的回顾<sup>[10]</sup>,尽管结合具体动物已经开展了不少的研究,但已有研究和动物运动的特异性间的关系尚未建立。脑内运动相关核团间信息传输的网络及其神经信息的传输和相互作用规律的认识还非常有限。

图2提示人们,通过对动物运动神经系统信息的调控和干预,可能实现对动物运动行为的调控和干预。该类工作国内外都有相当报道<sup>[11]</sup>。

神经系统对肌肉的指令信号通过神经的运动终板传递到肌肉组织,肌肉把化学能转化为机械能,并通过伸肌和屈肌间的拮抗作用,是开链的杆机构具有一定的刚度,获得稳定的位置。这种分布式布局的驱动方式,使机构获得了多个自由度,为动物运动机构实现运动模式的多元化提供了可能性。

由动物骨骼组成的机构是实现动物运动的重要基础,起到承载和传递外力和内力、保护核心器官的作用。关节是骨骼间相对运动的部分,动物的关节在不同方向往往具有不同的约束,形成完全自由度和部分自由度。这种关节的设计是一般机械系统的设计难于模仿的。

力是使动物运动的核心因素,为此,国内外研究者往往关注动物运动中的生物力学规律,运动生物力学研究人体或一般生物体在外界力和内部受控的肌力作用下的机械运动规律。这里,神经系统的控制和反馈过程以简明的控制规律代替,肌肉活动简化为受控的力矩发生器,动物体模型简化为由多个刚性环节组成的多刚体系统。相邻环节之间以关节相连接,在受控的肌力作用下产生围绕关节的相对转动,并影响系统的整体运动。

## 2 仿生运动体——机器人的发展和存在的问题

运动仿生表现为机器人的研制和开发。在智能机器人技术领域,动物的超级运动能力为智能机器人的发展提供了很好的生物学模板。动物的粘附机制及其仿生为爬壁机器人的研制提供了全新的理念。动物的精细感知能力、多信息融合能力、分布驱动模式和高度的环境适应性为智能机器人的发展提供了很好的参照。在高端装备和制造方面,研究

动物运动系统的特点,以期开发出和波士顿动力公司大狗相媲美的高负载多用途机器人;杆机构机器人的研制涉及机构与驱动、感知与信息融合、控制与通信、能源和节能等诸多方面。

杆机构机器人机构常用的有单腿机构(弹跳机器人)、双腿机构(仿人机器人)、四腿机构(进一步分为直立四足机构和匍匐四足机构,如仿狗机器人 Bigdog, 仿壁虎机器人)、多足机器人(仿昆虫六足机器人和仿蜘蛛八足机器人)。

单腿机器人国外 MIT 开展了很好的工作,成为 Boston 动力公司 Bigdog 机器人的前期基础。徐杨生院士也有很好的工作。该类研究中机构的稳定性控制和合理的驱动是研究的重点。

双腿机器人国外以日本的工作最好。国内以黄强团队在仿人机器人方面的工作最为出色,某些性能和展示的内容和日本人的工作不相上下。这类机器人在动力学稳定性、上肢和躯体行为对机器人的影响等方面已经开展了大量的工作。现有研究多采用电机驱动,该种驱动模式限制了机器人运动能力的进一步提升。

四足机器人是杆机构机器人领域多年的研究热点和重点,比较大型的陆地动物也多为四足运动机构。机构学上该机器人机构是非连续约束变结构机构,接触冲击和机构变型给机器人运动学和动力学的分析及综合添加了难度;其基本运动步态有3角步态和对角步态,前者可实现静态稳定,或者需要在动力学层面才能稳定,在非结构环境下各腿间的运动协调是这类机器人面临的新问题。驱动方面现有研究有电机驱动、液压(气压)驱动和气动人工肌肉驱动等方式。

多足运动机构机器人稳定性更加容易保障,对腿失效的容错能力提高,但在驱动方面更多的是能耗和自身重量难于减轻的问题,运动协调控制将成为这类机器人的主要的问题。

以下是陆上四足机器人研究存在的主要问题:

### 2.1 仿生的运动生物学基础匮乏

在感知方面,动物对周边环境的视觉、听觉、嗅觉等信号的作用范围及其融合方式上不够清楚、动物本体位姿感知与运动步态和运动方式的关系研究不够、动物脚底对运动反力及其方向的感知了解不足。动物在非结构复杂环境下感知与运动步态间的反馈调节机制几乎没有研究。在驱动方面,动物是分布式的肌肉驱动,而机器人是集中式驱动。如何采用尽量少的驱动,实现复杂多变的运动行为将是这类机器人发展的重要基础问题。动物学研究表

明,动物的肌肉-肌腱-骨骼系统并非仅仅是简单的驱动,还肩负存储能量的功能,且冲击接触过程的能量可重复利用达70%。对动物运动神经控制系统的研究表明,动物对运动反力和外界环境的反馈有机械-力学的动力学反馈和神经-驱动调节的神经反馈两种不同的机制,前者适应于快速、简单和局部的反馈,或者适应性复杂、全局和有中枢神经调节的反馈。将这些机制应用于机器人的运动控制将简化其运动控制,并提高机器人的适应性和运动能力。

### 2.2 对脚的研究不够

在动物运动中,脚具有感知接触力和接触状态、增加接触的稳定性、减少接触冲击力等多种功能。而目前机器人研究对脚的研究关注不够。如何提高脚的感知能力、接触适应性、增强脚的降低冲击和稳定性的能力,将是一个重要的方面。笔者在研究蝗虫脚掌降低冲击力、增加粘附接触能力的基础上,发明了一款柔性机器人脚,已经在所研究的四足机器人上使用。采用仿壁虎机器人关键的脚底刚毛阵列的制造技术,国外已经可实现10倍于壁虎脚底粘附力的碳纳米管阵列<sup>[12]</sup>(美国CASE的戴黎明),但阵列的力学性能还有待进一步深化研究。国内李清文和笔者合作正在研制类同的阵列。

### 2.3 驱动单元和驱动系统落后

目前机器人驱动电机和电源占机器人质量的比重依然偏大,多数微电极度具有大减速比,测定效率低,能耗高。而且很多时候电机的输出方式与机器人的驱动需求不一致。发展高效、轻质的驱动方式、驱动系统和驱动模块,对未来机器人的发展,具有重要的引导作用。流体驱动可能成为机器人驱动的重要方式之一。智能驱动材料和驱动结构是一个长期但重要的研究方向,将为机器人的发展和性能的提升带来质的飞跃。

### 2.4 环境感知技术不足

目前很多机器人采用的视觉及图像处理技术实现定位。但该系统耗时长,需要的资源多。发展高效快速的复眼视觉技术可为机器人视觉定位提供新的选择。多维的接触力学和状态的感知将是杆机构机器人必须发展的核心技术之一。

### 2.5 控制系统的设计有待整合

目前人们对动物运动神经系统的认识远没有所想象的那么深入,这很大程度上源于缺乏跨学科的人才及跨学科交流的不足,而这种交流需要有一定的对方学科的知识,以便可以理解交叉学科的概念、内涵和行为方式,还需要有持续的坚持,才可能

达到融合的程度。机器人运动的哪些方面需要按CPG模式?其适应到什么样的层次?不同控制级别的分工各相互交汇模式还有待于深化。

## 2.6 电源与节能技术

受电池储能量限制的移动机器人工作能力不足是一个全世界都在进一步探索的问题。目前机器人的电机驱动系统减速比多在100以上,其中不少齿轮是滑动轴承支撑,一般而言效率低于50%。而且不少情况下电机减速系统的质量和电机的质量相当,这又反过来增加了对驱动力的需求。以电池为动力源的情况下,电池的质量往往大于其他系统质量的和。发展新的驱动方式、能源供给模式和节能驱动方式是机器人走向商业化和实用化的重要一步。

杆机构机器人作为机器人技术的一个重要方面,在没有道路的复杂非结构环境下具有难以替代的作用。

## 3 运动仿生的未来发展

回顾动物运动的生物学机制和现有仿生机器人存在的问题,笔者大胆预测未来运动仿生的发展。

### 3.1 先进环境感知技术与单元

动物的环境感知是触觉、视觉、味觉、听觉等多信息融合的过程,动物体内的感觉神经元具有分布式、种类多样、每个感觉神经元功能特定、纳米尺度等特点,动物感觉神经元的结构和功能特点为人们发展新的传感器技术提供了很好的启示。而结构更加小巧、灵敏度更高、分布广泛的传感器系统,迫切需要采用纳米技术实现传感器的设计、制造和包装。依次为基础传感信息的采集、传输和处理,对信息技术提出了新的课题和挑战。同时,纳米技术和信息技术在动物感知方面的模拟和仿生应用又为人们认识动物感觉神经系统的工作提供了更好的模板和可行性,帮助解释动物脑神经系统运算和选择的规律性。

### 3.2 分布式驱动和智能驱动材料

驱动技术是机械系统进步的重要标志。从蒸气机、内燃机到电动机的技术革新,使机械系统的灵活性、能量利用效率和使用方便性得到了一次次飞跃和提升<sup>[13]</sup>。尽管电机在体积、重量、传动效率等方面已得到很大的改进,但仍不能满足高性能机器人(特别是仿生机器人、微型机器人)高灵活性、高效率、高冗余度和高负载/质量比的需要,是机器人性能远落后于所仿生动物的主要原因之一<sup>[1]</sup>。动物

的分布式(肌肉)直接驱动是它们具有运动灵活性(驱动自由度多)、鲁棒性(具有动能代偿)、高效率(最佳位置力输出)和高驱动能量密度(传统微型飞行器电机和传动占总体重的30%~50%)的主要原因。微机电系统发展呼唤新型驱动材料和驱动部件的发明和创新,已成为未来材料、机械和电气工程交叉领域迫切需要解决的关键问题之一<sup>[14]</sup>。

目前有望用于分布式驱动的材料包括形状记忆合金(Shape memory alloy, SMA)、电磁致动材料(Electromagnetic brake, EM)、压电材料(Piezoelectric material)、电活化聚合物材料(Electroactive polymers, EAPs)等,这些材料的工作频率和输出能量密度如图3所示<sup>[15]</sup>,可见EPAM(一种EAP材料)在10~10<sup>4</sup>Hz范围内具有最好的比功率(能量输出/质量),此外,EAP还有具有柔性、易于控制、性能类似于天然肌肉等特点。按工作原理,EAPs可分为电子型和离子型两类。电子型EAP靠电场驱动,所需电压相当高(场强约为150 V/ $\mu\text{m}$ );离子型EAP是基于带电离子的迁移和扩散实现驱动的。离子交换聚合金属材料(Ionic polymer metallic composite, IPMC)是一种离子型的EAP材料。与其他驱动材料相比,IPMC驱动电压低、位移量大;其变形收缩能力超过质地脆硬的电学陶瓷100倍以上,而且在响应时间、低重量及弹性上大大超过形状记忆合金<sup>[16]</sup>,成为近年来国内外研究的热点。

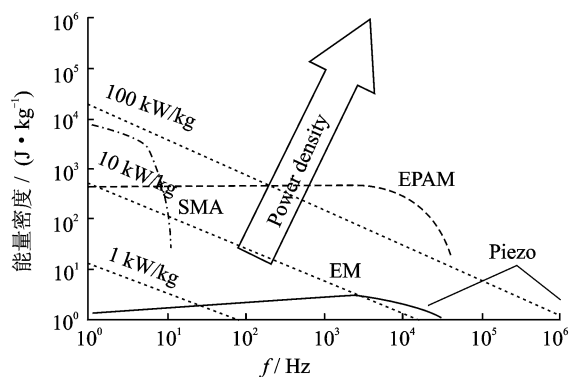


图3 EAP与其他几种材料能量密度的比较

笔者认为,IPMC可能是一类有前景的驱动材料。其研究可归为:(1)IPMC仿肌肉材料的制备和特性;(2)IPMC的致动机理研究;(3)设计和应用技术研究。1992年,美国的Shahinpoor等<sup>[17]</sup>、Sadeghipour等<sup>[18]</sup>及日本的Oguro等<sup>[19]</sup>几乎同时独立发现IPMC的电致动特性。1998年Shahinpoor等人<sup>[20]</sup>采用全氟磺酸聚合物(Nafion)、1999年

Oguro 等人<sup>[21]</sup>采用全氟碳酸聚合物(Flemion)作为基底聚合物,在含Pt和Ag等金属离子复合物水溶液中进行离子吸附和交换,随后通过化学还原过程在基体表面深处形成一层金属纳米颗粒,分别制备了IPMC。

IPMC的致动机理比较复杂,尚没有公认的理论。但是许多针对某一具体实验现象的电学模型<sup>[22]</sup>和力学模型<sup>[23-24]</sup>的建立以及材料致动行为的研究提高了人们对于IPMC的理解。目前学者们认为<sup>[25]</sup>,IPMC在结构上,基底Nafion分子同时具有亲水和憎水基团,在成膜中内部形成了许多纳米尺度的微管道。外加电场作用下,微管道内的溶剂化离子定向迁移,导致Nafion薄膜本体的形变(位移),进而产生张力。因此,持续的水分子迁移是保证IPMC工作的必要条件。

IPMC驱动器的性能主要表现为<sup>[26-28]</sup>:驱动电压低(低于10V,一般3V左右),输出位移大(弯曲位移超过32%),激励电压和频率对位移输出有明显影响。现有的IPMC驱动器主要存在两个缺点:(1)力输出较低;(2)离水工作时间较短,IPMC工作需要水合离子的参与,现有的IPMC适合用于水中或潮湿环境,对IPMC的进一步推广存在限制。近年的大量研究集中在上述方面,以便进一步提高IPMC的性能和工业应用的可能性。

尽管IPMC存在上述不足,它的独特性能和广泛应用潜力还是吸引了很多学者和工业界开展IPMC应用的尝试。美国JPL实验室和新墨西哥大学的人工肌肉研究所<sup>[29]</sup>研究用IPMC做四爪抓取器,设计使用IPMC作为人体心脏或人工心脏的辅助压缩舒张装置。韩国Kim等人<sup>[30]</sup>研制了IPMC驱动的八足机器人。日本公司EAMEX用IPMC驱动的人工鱼已经商业化<sup>[31]</sup>,一次充电它可在鱼缸里游半年。Zhang等<sup>[32]</sup>研制了能实现泳动、行走和漂浮的水下机器人;Yeom等<sup>[33]</sup>研制了仿水母机器人。这些研究和研制展示了IPMC潜在的应用市场,也预示着科学把幻想变为现实的可能性。

仿生驱动领域关于分布式驱动的研究尚未开展,基于智能驱动材料的驱动单元的研究和研制还不能满足工程的需要。

### 3.3 杆机构机器人与智能控制技术

美国在阿富汗战争中,毛驴战胜“悍马”,表明山地环境下杆机构动物的运动能力远胜于轮式运动系统。因此,美国DARPA在原来BIGDOG(大狗)的基础上,近期又投入320万美元发展运动能力更强的LS3。中国西藏和新疆也是高海拔的山地

环境,而且也是分裂势力从事恐怖活动比较活跃的地区,有着和阿富汗类似的问题。同时,中印边境也是不够稳定的地区。保障山地环境的运输能力,对降低特种兵的体力消耗、提高作战能力有重要支持作用。外空探索是近来航天活动的主要内容之一。无论是月球探测、或者是火星探测等,具有高度环境适应性的移动机器人,是实现在外星球上运动的重要手段。杆机构机器人环境适应性好,具有较强的运动功能代偿能力,是外空探测机器人的重要候选机构。

仿壁虎杆机构机器人除了上述杆机构机器人的特点外,还能够借助于范德华力粘附机制,实现不依赖于空气压力的干式、自清洁、多次重复使用的粘附。这种粘附机制实现的抓取在卫星轨道上依然有效,因此本项目发展的干式粘附机器人手,能够在空间环境下,比较容易地实现对非合作目标的对接。例如,可以用该粘附机器人抓取其他先进国家的卫星和航天器,从而实现获取相关技术、木马植入等,为基于航天的信息战和反信息战提供一种选择。同时,可以用于航天站内物体在航天器上的固定(干式粘附)。仿壁虎机器人在特种侦察、杆机构机器人在救灾等领域也有需求。

对杆机构机器人运动、控制、驱动、节能等行为规律的认识,还将反过来促进对动物运动、控制和感知机制和行为方式的收入认识,为残障人士的康复提供帮助。

### 3.4 动物运动规律的研究

对动物运动规律的揭示,在运动仿生研究中具有重要位置,是工程科学研究回馈和促进动物学研究的重要手段,也是动物学研究深化的必然需求<sup>[34]</sup>。如在流体(水和空气)中运动的动物,其运动力学量的检测依然十分困难,现有实验研究以飞行翅-动物整体运动行为的观测为主,同时辅助流场观测和基于流场观测的数值分析计算,依次获得动物运动中和环境间力学相互作用的信息。发展载体无线的超低力学量测试技术,直接获得动物在流体中运动时生物力学规律,具有重要意义和价值。目前已知海洋动物具有出色的降低身体和水界面阻力的能力,初步的仿生实践证明,可减低飞机阻力5%,船舶阻力12%,有巨大的经济和环境效益。纳米尺度功能器件的制造难以通过传统的去材方法实现,生物的自组织生长制造技术一旦推广应用,将改变制造科学的面貌,成为节能、节材微纳器件制备的核心技术。

## 4 结束语

从动物运动的生物学和仿生机器人的现状看,未来运动仿生发展的方向可以概括如下:

基于动物运动机构和驱动系统的生物机器人研究,科学问题是揭示动物运动相关脑区(核团)的相互关系、运动相关神经信息的传输规律和外界刺激下神经信息的演变规律。技术难点在于运动调控核团的精确定位方法和技术、阵列电极无干扰地定点植入技术、动物运动状态神经信息采集和调控的微型遥测遥控技术。

智能材料与仿生驱动技术,现有的智能驱动材料可能满足微型机器人运动的驱动力要求,如何像动物一样把各基本驱动单元的力募集起来,实现对较大型机器人的运动驱动,还需要做很多的工作。分布式驱动可能对未来机械系统的发展产生重要变革,这方面的研究有待深入。

纳米技术用于感知传感器的制造,将使仿生机器人更加灵活、智能;多信息采集、融合与信息技术结合,将进一步提高机器人的智能化。

### 参考文献:

[1] Dickinson M H, Farley C T, Full R J, et al. How animals move: An integrative view[J]. *Science*, 2000, 288:100-106.

[2] Schmidt-Nielsen K. Locomotion: Energy cost of swimming, flying, and running[J]. *Science*, 1972, 177(4045):222-228.

[3] 中国科学院生物物理研究所. 生物的启示: 仿生学四十年研究纪实[M]. 北京:科学出版社, 2008.

[4] 任露泉, 佟金, 李建桥, 等. 生物脱附与机械仿生——多学科交叉新技术领域[J]. *中国机械工程*, 1999, 10(9):984-986.

[5] Ren L Q, Deng S Q, Wang J C, et al. Design principles of the non-smooth surface of bionic plow moldboard [J]. *Journal of Bionics Engineering*, 2004, 1(1): 9-19.

[6] 周本濂. 复合材料的仿生研究[J]. *物理*, 1995, 24(10):577-582.

[7] 路甬祥. 仿生学的科学意义与前沿[J]. *科学中国人*, 2004(4):22-34.

[8] Oktar A. The miracle in the spider [EB/OL]. (2008-10-05) [2012-07-10]. <http://www.harunyahya.com/themiracleinthespider03.php>.

[9] 韩济生. 神经科学原理[M]. 北京:北京大学出版社, 1999.

[10] Ijspeert A J. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review [J]. *Neural Networks*, 2008, 21(4): 642-653.

[11] Talwar S K, Xu S H, Hawley E S, et al. Rat navigation guided by remote control [J]. *Nature*, 2002, 417:37-38.

[12] Qu L T, Dai L M, Stone M, et al. Carbon nanotube arrays with strong shear binding-on and easy normal lifting-off[J]. *Science*, 2008, 322:238-242.

[13] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学学部. 机械工程学科发展战略报告(2011—2020)[M]. 北京:科学出版社, 2010.

[14] Aliev A E, Oh J, Kozlov M E, et al. Giant-stroke, superelastic carbon nanotube aerogel muscles [J]. *Science*, 2009, 323: 1575-1578.

[15] Bar-Cohen Y. Electroactive polymers as artificial muscles: capabilities, potentials and challenges[EB/OL]. [2009-03-15]. <http://www.artificialmuscle.com>.

[16] Bar-Cohen Y, Oguro K, Tadokoro S, et al. Challenges to the transition of IPMC artificial muscle actuators to practical application [C]//Proceedings of the Fall MRS Meeting. Boston, USA: [s. n.], 1999: 13-20.

[17] Shahinpoor M. Conceptual design, kinematics and dynamics of swimming robotic structures using ionic polymeric gel muscles [J]. *Smart Materials and Structures*, 1992, 1(1):91-94.

[18] Sadeghipour K, Salomon R, Neogi S. Development of a novel electrochemically active membrane and "Smart" material based vibration sensor/damper[J]. *Smart Materials and Structures*, 1992, 1(2): 172-179.

[19] Oguro K, Kawami Y, Takenaka H. Bending of an ion-conducting polymer film-electrode composite by an electric stimulus at low voltage[J]. *Trans Journal of Micromachine Society*, 1992(5):27-30.

[20] Shahinpoor M, Bar-Cohen Y, Simpson J O, et al. Ionic polymer-metal composites (IPMC) as biomimetic sensors, actuators & artificial muscles—A review[J]. *Smart Materials & Structures Journal*, 1998, 7(6):15-30.

[21] Oguro K, Fujiwara N, Asaka K, et al. Polymer electrolyte actuator with gold electrodes, smart materials and structures[C]//Proc SPIE. Newport Beach, CA: [s. n.], 1999, 3669:64-71.

[22] Paquette J W, Kim K J, Nam J D. An equivalent circuit model for ionic polymer-metal composites and their performance improvement by a clay-based polymer nano-composite technique[J]. *Journal of Intelligent*

- gent Material Systems and Structures, 2003, 14 (10): 633-642.
- [23] Tadokoro S, Yamagami S, Takamori T, et al. An actuator model of ICPF for robotic applications on the basis of physicochemical hypotheses[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Symposia Proceedings. [S. l.]: IEEE, 2000, 2 (2):1340-1346.
- [24] Nemat-Nasser S, Zamani S. Modeling of electrochemomechanical response of ionic polymer-metal composites with various solvents[J]. Journal of Applied Physics, 2006,100(6): 1-18.
- [25] De Gennes P G, Okumura K, Shahinpoor M, et al. Machanoelectric effects in ionic gels[J]. Eyrrophys Lett, 2000,50(4):513-518.
- [26] Bar-Cohen Y, Xiao Bao. Characterization of the electromechanical properties of ionomeric polymer-metal composite (IPMC) [C]//Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials Symposium, EAPAD Conference. SanDiego, CA: SPIE, 2002: 286-293.
- [27] Nemat-Nasser S, Wu Y X. Comparative experimental study of ionic polymer-metal composites with different backbone ionomers and in various cation forms [J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(9):5255-5267.
- [28] Lee S G, Park H C, Pandit S O, et al. Performance improvement of IPMC (Ionic polymer metal composites) for a flapping actuator[J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2006, 4 (6):748-755.
- [29] Bar-Cohen Y. Electro-active polymers: Current capabilities and challenges [C]// Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials Symposium, EAPAD Conference. SanDiego, CA: SPIE, 2002, 4695:1-7.
- [30] Kim B, Ryu J, Jeong Y, et al. A ciliary based 8-legged walking micro robot using cast IPMC actuators[C]//Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Taipei, China:IEEE, 2003:2940-2945.
- [31] Bar-Cohen Y. Worldwide electroactive polymers[J]. EAP (Artificial muscles), 2001, 5(1):1-15.
- [32] Zhang W, Guo S X, Asaka K. A new type of hybrid fish-like microrobot[J]. Int J Autom Comp, 2006, 4: 358-365.
- [33] Yeom S W, Oh I K. A biomimetic jellyfish robot based on ionic polymer metal composite actuators [J]. Smart Mater Struct, 2009,18(8): 1-10.
- [34] 戴振东, 吉爱红. 壁虎的运动力学与运动仿生[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2011.