

文章编号:2095-0411(2015)01-0001-10

# 仿生机器人研究进展及仿生机构研究<sup>\*</sup>

沈惠平,马小蒙,孟庆梅,李云峰,马正华

(常州大学 机器人研究所,江苏 常州 213016)

**摘要:**以自然界仿生对象为基础,介绍了国内外现有的 5 类仿生机器人——仿飞行生物机器人、仿陆地生物机器人、仿水下生物机器人、仿水陆两栖生物机器人及仿人机器人的研究现状及最新进展,详细阐述了每种仿生对象的特点,仿生机器人的基本结构、性能特征及应用前景。在分析仿生机器人机构特性的基础上,提出并阐述了仿生机器人仿生机构的冗余驱动原理、欠驱动仿生原理、变胞结构设计、运动稳定性设计、高承载自重比设计,以及新型仿生材料设计等重要研究内容。

**关键词:**仿生学;扑翼机;行走机器人;水下机器人

**中图分类号:** TP 24

**文献标识码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.2095-0411.2015.01.001

## Research Progress on Bionic Robots and Research Issues of Bionic Mechanism

SHEN Hui-ping, MA Xiao-meng, MENG Qing-mei, LI Yun-feng, MA Zheng-hua

(Robot Institute, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

**Abstract:** The present research progress and the latest development of 5 types of bionic robots, including bionic flying robots, bionic terrestrial robots, bionic underwater robots, bionic amphibious robots and humanoid robots, are presented based on the natural bionic creatures. Then the characteristics of bionic creatures, the basic structure, the performance characteristics and the application prospects of bionic robot are described in detail. Finally, the research direction and some important research issues of bionic robot mechanisms are discussed, which are principles of bionic robot redundant actuation, underactuated bionic principle, design of metamorphic structure, design of motion stability, design of high bearing weight ratio and design of novel biomimetic material.

**Key words:** bionics; ornithopter; walking robots; underwater robots

仿生学作为一门独立学科于 1960 年 9 月正式诞生,1963 年我国将“Bionics”译为“仿生学”<sup>[1]</sup>,它是指模仿生物建造技术装置的科学,主要研究生物体结构、功能和工作原理,并将这些原理移植于工程

技术之中,用来发明性能优越的仪器、装置,创造新技术。仿生学的问世开辟了独特的技术发展道路,即向生物界索取工程技术解决方案蓝图的道路,它大大开阔了人们的眼界,显示了极强的生命力。

<sup>\*</sup> 收稿日期:2013-09-16。

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51375062);江苏省重大科技支撑与自主创新资助项目(BE2013003, BE2010074)。

**作者简介:**沈惠平(1965—),男,江苏吴江人,教授,主要从事方向机构学、并联机器人研究。

## 1 仿生机器人最新研究进展

自然界有丰富多彩的生物体,其优异的结构和特殊的功能成为仿生学可研究的宝藏性资源。本文以自然界仿生对象为基础,即仿飞行生物、仿陆地生物、仿水下生物、仿水陆两栖生物及仿人 5 类,分别介绍了国内外现有的 5 类仿生机器人的研究现状与最新进展。

### 1.1 仿飞行生物机器人

#### 1.1.1 仿蝙蝠机器人

1) 美国加州理工学院的微型蝙蝠无人机

美国加州理工学院等联合研制微型蝙蝠 MicroBat<sup>[2]</sup>,如图 1(a)所示。它是一种手掌大小的电动扑翼机,其机翼采用微电机系统技术,且特别制作了一种轻型传动机构,能将微型电机的转动转变为机翼的上下扑动能,可产生升力和推力。它由电池驱动,用无线电遥控控制,通过齿轮机构、双连杆机构驱动机翼上下扑动。该微型扑翼机翼展 15.24cm,质量 10g,机翼能以 20Hz 的频率挥舞。2001 年底,该机型最长留空时间提高到 6min17s。

2) 美国密西根大学的蝙蝠机器人

美国密西根大学 2008 年研制的蝙蝠机器人<sup>[3]</sup>,如图 1(b)所示,其长约 183cm,重约 113g,功率约为 1W。主要包括:微型传感器、通讯工具和专用电池,以及一组可从不同方向追踪声波的迷你麦克风和针对反射性物质和有毒气体的微型侦测器等。这使得该蝙蝠机器人在夜间依旧能够稳定飞行。它可通过振动的方式或利用太阳能、风能等能源给蝙蝠机器人的锂电池充电。这些蝙蝠可通过街道或建筑上的停留侦测,为行军中的士兵提供支持,并使用无线电向部队传送讯号。

3) 美国北卡罗莱纳州立大学的蝙蝠机器人

美国北卡罗莱纳州立大学格奥尔基·邦盖特等于 2009 年研制一种手掌大小的蝙蝠机器人<sup>[4]</sup>,其质量不足 6g,如图 1(c)所示,可作为未来侦察或数据收集的工具。该蝙蝠机器人四肢处的关节采用具有超强弹性的形状记忆合金制成,能够帮助蝙蝠机器人完成各种需要的运动。蝙蝠机器人肌肉采用智能材料合金,合金内头发般粗细的微型电线,能够使“金属肌肉”收缩,让蝙蝠机器人能够迅速应对不断变化的外部条件。



(a) MicroBat

(b) 机器蝙蝠

(c) 机器蝙蝠

图 1 蝙蝠机器人

Fig. 1 Bat robot

#### 1.1.2 形似飞蠓的 ASN-211 微型扑翼飞行器

ASN-211 微型扑翼飞行器<sup>[5]</sup>由西安爱生公司 2010 年研制生产,全机质量 220g,如图 2 所示。该微型扑翼飞行器具有体积小、隐蔽性好、质量轻、携带方便、操作简单等特点,可用于近距离地空侦查,可由单兵携带。整个系统由飞行器、动力能源、飞行控制与导航、测控与信息数据传输、任务设备和图像处理等分系统组成,具有自主起飞和自主巡航的能力。机腹下方装有微型摄影机,可以实时获取地面目标信息,实现侦查功能。



图 2 ASN-211 微型扑翼飞行器

Fig. 2 ASN-211 flapping wing micro air vehicle

#### 1.1.3 纳米蜂鸟侦察无人机

美国航空环境公司等自 2006 年历时 5 年时间研制成纳米蜂鸟侦察无人机<sup>[6]</sup>,如图 3 所示。它可放入口袋,其翼展仅 16cm,重 19g,可如真鸟一般,通过拍打翅膀驱动,依靠电池飞行,能在战场和城市进行侦察。这架无人机上配备高清晰的摄像装置,可以 5m/s 的速度在建筑物间飞行,抵御住 2.2m/s 的风,飞行时间持续 8min。

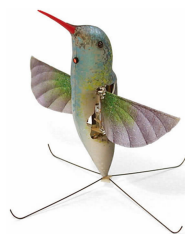


图 3 纳米蜂鸟

Fig. 3 Nano hummingbird

#### 1.1.4 机械苍蝇

1) 美国加州大学的机器苍蝇

美国加州大学研制出如图 4(a)所示的能飞翔的机器苍蝇<sup>[7]</sup>。该机器苍蝇用 4 只机械翅膀模仿苍蝇的翅膀,相对躯体可以实现 2 个方向的转动,通过装在机器苍蝇头部的微型传感器与摄像机,可以将拍摄到的照片传回。该机器苍蝇不仅能够充当间谍角色,用于军事上的侦察,还可用在灾难中搜寻废墟中的人员。

2)美哈佛大学的“苍蝇机器人”  
美国哈佛大学罗伯特伍德于 2007 年公布研发出一种和真苍蝇几乎同样大小的“苍蝇机器人”<sup>[8]</sup>,如图 4(b)所示。它主要由碳纤维制成,体重只有 60 mg,翼展仅 3cm,“苍蝇机器人”每次大约只能持续飞行 5min,且只能沿一个方向飞行。

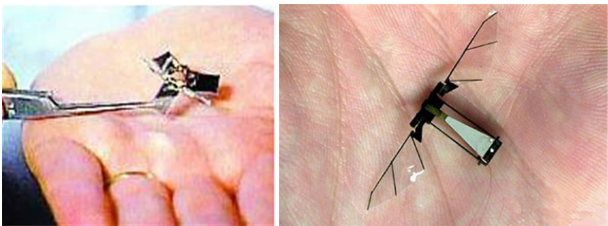


图 4 机械苍蝇  
Fig. 4 Fly robot

1.1.5 机器雨燕

由荷兰代尔夫特科技大学 2008 年开发出能灵活模拟鸟类动作的机器雨燕<sup>[9]</sup>,如图 5 所示。其翼展达 51cm,重约 80g,携带 3 个微型摄像头。它通过两翼和尾部的机械结构来调节飞行的方向和角度,以此来实现像真的雨燕一样灵活飞行。

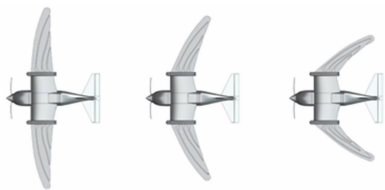


图 5 机器雨燕  
Fig. 5 Swift robot

1.1.6 “生物选择者”蜻蜓机器人

德国费斯托公司于 2013 年设计出一款“生物选择”的蜻蜓机器人<sup>[10]</sup>,如图 6 所示。该蜻蜓机器人长 44cm,翼展可达 63cm,重 175g,具有 4 个翅膀,采用四翼碳纤维折叠翅膀,每秒可以拍打 20 次,能够像真实蜻蜓一样在空中任何方向颤振翅膀,其翅膀由 9 个伺服电动机操控,每个翅膀能够旋转 90°,便于控制冲角使其能够向前、向后和向侧面飞行。该蜻蜓机器人可以通过智能手机进行控制。

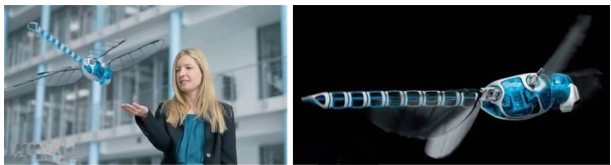


图 6 “生物选择者”蜻蜓机器人  
Fig. 6 “Biological selector” dragonfly robot

1.2 仿陆地生物机器人

1.2.1 仿尺蠖机器人

美国密执根州立大学仿尺蠖微小型爬壁机器人模型 FLIPPER,如图 7 所示,该机器人展开长 32cm,宽 5cm,重 700g。它由 4 部分组成:足 1、足 2、腿 1 和腿 2。机器人共有 5 个自由度,其中:两踝关节采用差速机构,各自具有 2 个自由度;膝关节只有 1 个转动自由度;5 个关节均采用 Faulhaber 公司的 1524SR 型直流伺服电机驱动;每个足上均安装有一个真空泵和真空阀,足下装有吸盘,机器人能吸附在光滑表面。

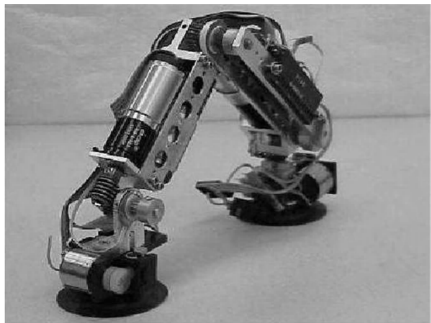


图 7 仿尺蠖微小型爬壁机器人 FLIPPER  
Fig. 7 Micro wall climbing inchworm robot FLIPPER

1.2.2 仿蟑螂六腿机器人

美国加州大学制造的 VelociRoACH<sup>[11]</sup>是长度为 10cm 的仿蟑螂机器人,如图 8 所示。主要由硬纸板制造而成,运行速度 2.7m/s,成为世界上速度第二的机器人,仅次于波士顿动力公司 3.2m/s 的猎豹。该蟑螂机器人有 6 个弹性 C 形腿,左右快速旋转,每秒撞击地面 15 次以推动它前进,看起来像翅膀一样的一根细塑料板在高速运动中保持着机器人的稳定性。

1.2.3 机器蜘蛛

1)徐工步履式挖掘机 ET110  
中国徐工集团苦心研发的新一代类似蜘蛛的智能步履式挖掘机 ET110,如图 9(a)所示。它可适应各种地形变化,采用步履、轮式驱动结合的复合式结



构,可实现全轮驱动、全轮转向、轮腿复合。不仅可在普通环境下作业,而且在高寒、高海拔地区、陡峭的山坡、水网、沼泽地带一样可以自如的作业。2)新加坡六足蜘蛛机器人

新加坡南洋理工学院和施密德工程公司等设计制造的用于支持营救工作的六足机器人蜘蛛<sup>[12]</sup>,如图 9(b)所示。它由 6 只独立的下肢组成,可以任意方向移动;其行走与旋转运动是模仿六足昆虫的高层次运动模式,通过 3 条下肢移动而另外 3 条下肢抬高,机器人可以达到期望的行走速度,并提供恶劣地带所需的足够平衡,它具有多功能机电系统及 24 个自由度的智能运动控制系统。六足机器人的“眼睛”装有一个智能摄像头和一个距离测量传感器,可利用蓝牙技术实现无线通信。

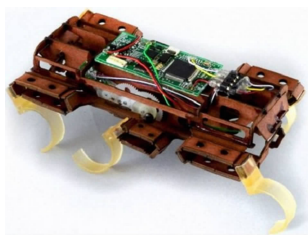


图 8 加州大学 VelociRoACH 蟑螂机器人

Fig. 8 Cockroach robot VelociRoACH



(a)挖掘机 ET110

(b)六足蜘蛛

图 9 蜘蛛机器人

Fig. 9 Spider robot

#### 1.2.4 仿壁虎机器人

##### 1) 美国壁虎机器人 Stickybot

美国斯坦福大学 2006 年研制壁虎机器人“Stickybot”,如图 10(a)所示。其足底有数百万根由人造橡胶制造、极其微小的毛发,每根细毛的直径大约只有 500nm,长度不到  $2\mu\text{m}$ ,这使得 Stickybot 的吸力手能非常接近玻璃壁的表面,两者的分子之间会产生分子弱电磁引力“范德瓦尔斯力”,毛发通过范德瓦尔斯力分子间力吸附在墙壁上,每根毛发的末梢,还有上千根更加细小的毛发分枝,每根毛发分枝的前端又有一个分叉,无数的这种“范德瓦尔斯力”集合起来,使得 Stickybot 机器人能够在墙壁上自由行走。这种机器人可以作为行星探测器、空间

卫星维修或救援装置来使用。

##### 2) 南京航空航天大学仿壁虎机器人

2011 年南京航空航天大学戴镇东团队研发出仿生“大壁虎”,如图 10(b)所示。该机器人通体由白色铝合金组成,长 150mm(不连尾巴),宽 50mm 左右,在不包含电池的状况下的质量只有 250g,长尾巴同样为铝合金材质,采用可充电的锂电池来提供电源,通过芯片来进行控制,目前可在垂直  $90^\circ$  的平面上实现爬行。未来可代替人类执行反恐侦查、地震搜救等“高难度”的任务。



(a)Stickybot

(b)“大壁虎”

图 10 壁虎机器人

Fig. 10 House lizard robot

#### 1.2.5 仿蚯蚓机器人

蚯蚓的爬行是通过反复的伸缩拉伸肌肉实现挪动,在孔内前进则通过前后部先后膨胀压紧移动。麻省理工大学、哈佛大学和首尔国立大学设计出一款能够模仿这种动作的机器人,如图 11 所示,称为“网眼虫”。它通过身体各部位的伸缩,在地面上爬行,看起来非常像蚯蚓。这台几乎完全由柔软材料制成的机器人非常富有弹性,非常适合在崎岖的地面或在狭窄的空间里行进。



图 11 网眼虫

Fig. 11 Net insect

#### 1.2.6 仿小象机器人

上海交大高峰教授团队研制出仿生小象机器人,如图 12 所示。小象机器人能走会跳,还能背超过 70kg 的重物,每小时能跑 4km,能爬  $10^\circ$  的斜坡,腿部可做 12 种自由变化,自带动力源,不用连接外部动力通讯电缆。“小象”身上装有力觉测量与实时感知信息反馈系统,以实现“小象”的动态平衡与稳定控制,“智能小象”采用人机交互远程操控方式,完

成复杂危险环境下的搬运、搜索、探测和救援作业等任务。



图 12 仿小象机器人

Fig. 12 Imitation elephant robot

1.2.7 仿大狗机器人

美国波士顿动力学工程公司研究设计的大狗机器人(Bigdog),如图 13 所示。它可在交通不便的地区为士兵运送弹药、食物和其他物品,能够在战场上发挥重要作用。其原理是由汽油机驱动的液压系统带动有关节的四肢运动,陀螺仪和其他传感器帮助机载计算机规划每一步的运动,机器人依靠感觉来保持身体平衡,如果有一条腿比预期更早地碰到地面,计算机就会认为它可能踩到了岩石或是山坡,然后 Bigdog 就会相应地调节自己的步伐,遭到横加猛踹之后,也只是打个趔趄,但仍可继续前行。



图 13 Bigdog

Fig. 13 Bigdog

1.3 仿水下生物机器人

1.3.1 仿章鱼机器人

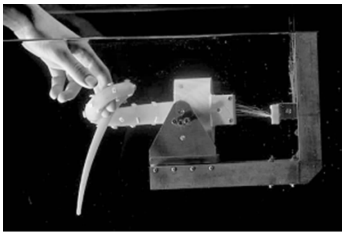
1) 章鱼触手机器人

意大利比萨的圣安娜高等学校于 2013 年制造出“章鱼触手”机器人,如图 14(a)所示。它长 43cm,仿照栖息在地中海的真正章鱼设计,可用于工作空间狭小、障碍物众多的非结构环境。这种带有“软硬功”的触手由一根钢丝连接着一组尼龙牵线包裹在硅胶制成的皮肤里面构成。借助尼龙牵线操纵中央的钢丝,触手可以像蛇一样环绕对象,随即变得坚硬,将对象牢牢抓住。章鱼机器人可用于水下搜寻、救助和科学探索。

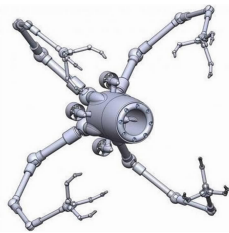
2) 仿章鱼水下机器人

德国不莱梅弗劳恩霍夫与德国 DFKI 人工智能

研究中心于 2009 年合作开发带有灵敏触觉的水下机器人,如图 14(b)所示。这种仿章鱼机器人配备了应变仪,能在遇到障碍物时产生电阻变化,应变仪被印在机器人身上,宽  $10\mu\text{m}$ ,约一根头发一半的宽度,由雾化粒子构成,极其敏感。2013 年 4 月,上海交大高峰教授团队也已研制出仿章鱼水下机器人,它是基于 8 腿移动并联机器人平台。



(a) 章鱼触手机器人



(b) 章鱼水下机器人

图 14 章鱼机器人

Fig. 14 Octopus robot

1.3.2 机器鱼

1) 美国形似鳟鱼的机器鱼

美国麻省理工学院最新研制形似鳟鱼的机器鱼<sup>[13]</sup>,如图 15(a)所示,长约 13cm,其显著特点是运动姿态自然,模仿鱼的运动方法,相较于传统螺旋桨运动没有机械传动的生硬感觉,这种鱼形机器人更加容易地潜入传统潜水艇无法进入的水域。大批量的机械鱼可用来探测水底物体并进行环境污染监测或生态研究。

2) 中国北航机器鱼 robofish

北京航空航天大学机器人研究所研制出一条机器鱼“robofish”,如图 15(b)所示,长 0.8m,重 800g,在水中最大速度为 0.6m/s,能耗效率为 70%~90%,控制上采取计算机遥控方式。该鱼体为一个平面六关节机构(即有 6 节鱼身),包括鱼头和鱼尾 2 个部分。鱼头是利用玻璃钢制作的,仿造鲨鱼形状的壳体,整个鱼的动力电池、接收部分都放在鱼头里,鱼尾的 6 个伺服电机扭转摆动作为推动器。

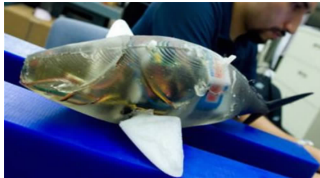


图 15 机器鱼

Fig. 15 Fish robot

1.3.3 机器水母

1) 德国机器水母

德国费斯托工程公司 2008 年在汉诺威工业展

览会上展示如图 16 所示的机器水母<sup>[14]</sup>,其球形身体是用激光烧结制成的密封舱,它长着 8 根触须,每根触须包含软硬适度的“主心骨”,连着柔性的表面,表面分成 2 个腔,可分别调整压力使整个触须向某个方向弯曲。每根触须的顶端都有小鳍,受触须带动,小鳍像鱼尾那样划水,推动水母机器人前进。压力传感器可以精确测出当前所处的深度;光感应器反馈潜在障碍的大致位置,通过遥控器远程操控,机器水母也可以实现完全智能化工作,圆顶结构内的 11 个红外发光二极管可实现彼此间的通讯。

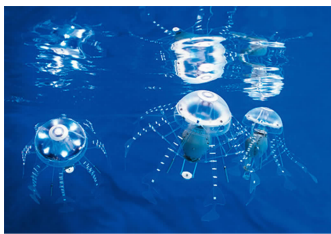


图 16 机器水母

Fig. 16 Jellyfish robot

#### 2) 美国机器水母

美国弗吉尼亚理工学院 2012 年研制出机器人水母“Cyro”,如图 17 所示。它是一台中性浮力机器人,宽 1.7m,重 177kg,由可充电的镍氢电池提供动力持续使用几个月,像水栖间谍一样在海洋中巡游,其体积较大,且与成年人体重相近。机器人水母具有由厚硅树脂材料制成,粘乎乎的“皮肤”,使用 8 个机械控制手臂游动,每个机械臂均由一个独立的直流电机驱动,它能够保持水母物种的外型特征和运动学,独立地在水中游动,同时可收集、存储、分析和传达敏感数据,用于自动检测海洋环境,监视、绘制海底地图或其他工作。

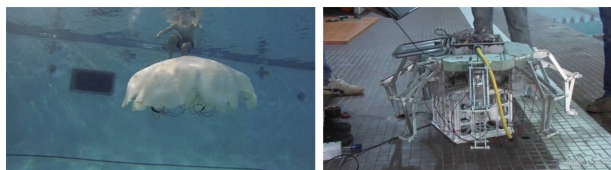


图 17 机器水母 Cyro

Fig. 17 Jellyfish robot Cyro

### 1.4 仿水陆两栖生物机器人

#### 1.4.1 机器龙虾

图 18 所示机器龙虾由约瑟夫·艾尔斯研制,其外形像真龙虾,是长着能够感知障碍物的触须的小型机器人。它的 8 条腿允许它们朝着任意一个方向移动,爪子和尾巴则帮助它们在湍急的水流以及其

他环境下保持身体稳定性。这些机器龙虾拥有很高的灵活性,可用于探测水下矿藏。



图 18 机器龙虾

Fig. 18 Lobster robot

#### 1.4.2 蛇形机器人

##### 1) 日本东京工业大学的蛇形机器人

日本东京工业大学于 2004 年发明了一种蛇形机器人<sup>[15]</sup>,如图 19(a)所示,这种机器人可在地震或火灾发生时搜索埋在瓦砾下的幸存者。它由 3 节组成,长 1.2m,重 25kg。遇到障碍物时,它可以扭动身体躲开或越过,头部的数码相机可捕捉前方各种画面。操控人员可根据机器人捕捉到的画面发出指令,让机器人停止、前进或改变方向。这种机器人还装有红外线照相机,即使在黑暗的地方也能清晰地发现前方目标。特殊的防水装置和小车轮使这款机器人能在水下和陆地自由活动。

##### 2) 德国 Gavin H 的蛇形机器人

德国人 Gavin H 从 1997 年开始从事蛇形机器人研究工作,到目前为止共设计并制作了 S1, S2, S3, S4, S5 五代蛇形机器人,图 19(b)所示为 S5 蛇形机器人,其各个关节形状尺寸不同,能高度模拟生物蛇,但其为二维结构,无法完成三维空间运动。该蛇形机器人依靠从动轮而不是摩擦运动,运动速度很高,主要运动方式为游动。

##### 3) 美国蛇形机器人“山姆大叔”

美国卡耐基梅隆大学 2012 年研制名为“山姆大叔”<sup>[16]</sup>的机器蛇,如图 19(c)所示,其运动是对真蛇的运动进行生物模拟,包括侧向缠绕、扭动以及旋转动作。这条机器蛇还能够缠绕着树干,在树的表面垂直往上爬。“山姆大叔”使用模块化的分段模型制造,模型包含制动器与传感器;同时头部模型配备了一个摄像机。机器蛇可应用于定位坍塌建筑中的幸存者,也可被用于检验桥梁、矿山以及拆除炸弹。

##### 4) 中国科学院沈阳自动化研究的蛇型机器人

中国科学院沈阳自动化研究的蛇型机器人具有较高环境适应能力,如图 19(d)所示。其身長 144cm,体重 3kg,行走速度最快可达 0.4m/s,头部装有微型摄像机,可实时采集现场图像并用无线传输发回监控台。蛇形机器人具有基于仿生模块化、



可变结构设计的灵活肌体,采用了分布式神经网络控制方法,在嵌入式微机控制器的核心指挥下,具有三维空间运动能力,可以自动识别地面环境特征,相应采取蜿蜒、侧动、伸缩、翻滚等各种步态,在硬地面、沙地或软土中爬行,还能够跨越 10cm 宽的坑沟,或探测疏理管网通道,深入洞穴缝隙。



图 19 蛇型机器人

Fig. 19 Snake robot

1.4.3 机器螃蟹

水下勘察探测机器人<sup>[19]</sup>是由英国巴斯大学设计,如图 20 所示。其外形与螃蟹十分相似,两侧都有 4 条腿,能自如地攀爬越过鹅卵石和小碎石,非常稳定,可执行相应的指令而避免多足之间的不协调冲突。这个机器人可在同一机动速度下行进,但通过改变步幅长度能够改变行走速度,目前可以在陆地上任意移动,未来的开发设计将计划用于完全的水下勘测任务操作。



图 20 水下勘察机器人

Fig. 20 Underwater exploration robot

1.5 仿人机器人

人是最高等的动物,因此,仿人机器人也可以看作是仿生机器人的一种,其研究始于 20 世纪 60 年代末,它是一种外观与人相似,具有移动功能、感知功能、操作功能,具备学习能力、自治能力,是具有联

想记忆、情感交流的智能机器人<sup>[18]</sup>。

1.5.1 国外仿人机器人研究进展

1986 年至今,本田公司已成功研发 P1、P2、P3 系列仿人机器人,如图 21(a)、(b)、(c)所示,P1 机器人身高 182cm,质量为 210kg,主要用于双足行走的基础研究;1996 年研制的 P2 机器人可上下台阶及搬移物体;1997 年研制的 P3 机器人<sup>[19]</sup> 身高 160cm,质量为 130kg,机械连杆结构由镁合金材料搭建。2000 年,本田公司研制 ASIMO 仿人机器人<sup>[20]</sup>如图 21(d)所示,其可自由流畅地行走、上下台阶等,能辨识面部表情、声音与姿势命令等。

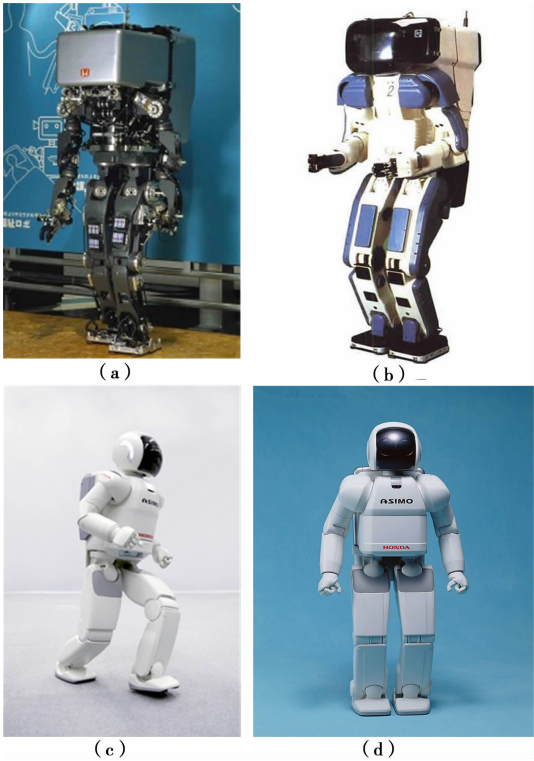


图 21 本田公司机器人

Fig. 21 Honda corporation robot

2010 年,日本产业技术综合研究所研制的 HRP-4 型仿人机器人,它有 42 个自由度,如图 22 所示。其面部表情由 8 个电机控制,具有日本女性外形,能辨识并模仿人类歌唱时的声音音色和喜怒哀乐等表情特征,被誉为迄今为止最接近人类的机器人。

2004 年,韩国科技先进研究院研制出 41 个自由度的 HUBC 仿人机器人,如图 23(a)所示。它高 125cm,重 55kg,步幅 30cm,时速为 1.5km/h,配置视觉跟踪机制,能辨识语音输入并合成语音输出。

德国慕尼黑科技大学研制出 Johnnie 仿人机器人,如图 23(b)所示,它有 17 个自由度,身高

180cm, 体重 40kg, 可实现快速行走。

法国 INRIA 组织等于 2000 年研制出 BIP2000 仿人机器人, 如图 23(c) 所示, 其腿部具有 15 个自由度, 不仅可以平底行走, 还可以上下楼梯和斜坡。



图 22 HRP-4

Fig. 22 HRP-4

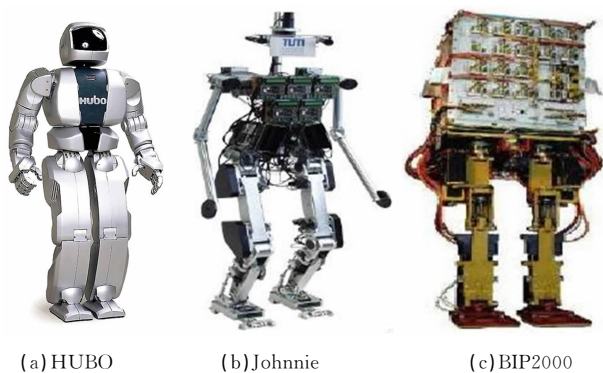


图 23 国外仿人机器人

Fig. 23 Foreign humanoid robot

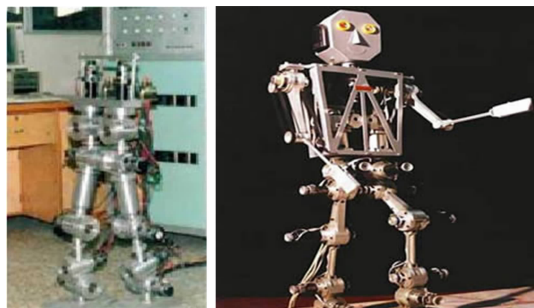
### 1.5.2 国内仿人机器人研究进展

作为我国最早开始研究机器人的高校——哈尔滨工业大学自 1985 年至今, 先后研制成功 HIT-I、HIT-II、HIT-III 仿人机器人<sup>[21]</sup>。HIT-I 机器人有 10 个自由度, 高 110cm, 重 70kg, 步幅 45cm, 步速 10s/步, 可实现平地前向与侧向的双足步行、台阶行走等动作; HIT-II、HIT-III 机器人具有 12 个自由度, 高 103cm, 重 42kg, 步幅 24cm, 步速 2.3s/步, HIT-III 仿人机器人如图 24(a) 所示。

1988 年, 国防科技大学研制出 KDW-I 机器人, 它具有 6 个自由度, 步幅 40cm, 步速 4s/步; 第二年, KDW-II 问世, 它有 10 个自由度, 可实现静态步行与左右侧向动态行走; 第三年, KDW-III 研制成功, 它具有 12 个自由度, 步幅 22cm, 步速 0.8s/步, 可实现平地全向行走与斜坡行走。2000 年, “先行者”仿人机器人研制成功, 如图 24(b) 所示。它身高 140cm, 重 20kg, 对不确定环境具有适应能力。2003 年, 国防科技大学研制第四代无缆线仿人机器人, 它具有 36 个自由度, 正交轴关节构造, 可实现灵活的头部、手部、腿部等动作与无缆线行走。

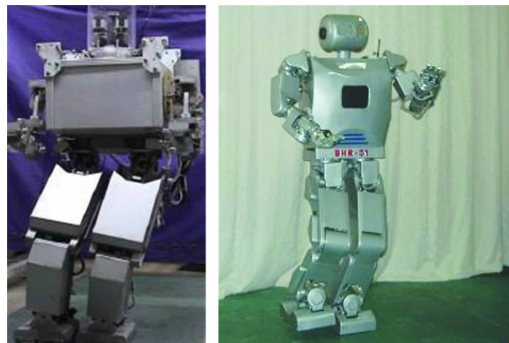
清华大学 2002 年研制出具有 32 个自由度的 THBIP-I 机器人<sup>[21]</sup>, 如图 24(c) 所示, 它身高 170cm, 重 130kg, 配有陀螺姿态传感器、6 维力传感器、视觉系统和语音识别系统。同年, THBIP-II 机器人问世, 它具有 24 个自由度, 高 70cm, 重 18kg, 具有视觉、听觉能力, 且具有感知层、决策层、协调层、执行层等控制结构, 能执行平地行走、上下楼梯等。2006 年, 平面欠驱动双足机器人 THBIP-III 研制成功, 行走步幅 13cm, 步速 0.64s/步。

北京理工大学 2002 年研制出 32 个自由度的 BHR-1 仿人机器人<sup>[21]</sup>, 如图 24(d) 所示, 其通过传感器可实现凹凸地面的稳定性行走。随后 2005 年, 研制出“汇童”系列仿人机器人。汇童 4 代高仿真仿人机器人有 46 个行动关节, 可逼真地呈现人类面部喜怒哀乐的细致表情和人机对话。汇童 5 代机器人有 30 个自由度, 突破了基于告诉视觉的灵巧动作控制、全身协调自主反应等关键技术。



(a) HIT-III

(b) 先行者



(c) THBIP-I

(d) BHR-1

图 24 国内仿人机器人

Fig. 24 Domestic humanoid robot

## 2 仿生机构特性及研究内容

### 2.1 仿生机器人机构的特性

综上所述, 仿生机器人近几十年得到了迅速发展, 根据对以上 5 类仿生机器人基本结构和性能的分析, 可知作为其骨架和执行装置的仿生机构, 与传



统的刚性机构相比,具有如下特性:

1) 仿生机器人机构灵活性高、功能复杂。仿生机器人模仿生物运动或生物行为功能,具有较高的感知能力和处理能力,因此,要求其机构具有较高的灵活性,部件亦可独立参加工作。

2) 存在有高冗余自由度,如蛇形机器人,其关节自由度大于确定空间机器人位姿所需自由度。这种自由度的冗余,允许其在不平坦的地面和非结构环境下运动并保持动态稳定。

3) 仿生机器人所用材料不全是传统刚性机构所用钢铁合金,越来越多的仿生机器人使用如形状记忆合金、可伸缩智能材料,以满足对材料性能高、形状可控等特殊要求。

4) 仿生机器人机构的拓扑结构可变性,即其具有变构态、变自由度等特性,但其机构仍能保持良好的运行性。

## 2.2 仿生机器人机构的研究内容

根据仿生机器人机构的特性,凝炼出以下仿生机构研究的重点和方向:

1) 仿生机构的冗余驱动原理。冗余驱动是驱动输入数目多于自由度数目的驱动方式。仿生机器人的冗余驱动可通过调整驱动力、优化输入力、降低机构关节内力、提高机器人力传递能力和改善机构性能等,还可以通过确定机构输入力和速度,使仿生机器人在奇异位置也能工作。仿生机器人冗余驱动分析是基于运动学反解且仅存在于闭环系统中<sup>[22-23]</sup>。

2) 仿生机构的欠驱动仿生原理。欠驱动机器人<sup>[24-25]</sup>是一类非完整约束机械系统,主要特征之一是可可通过控制少维输入实现高维数机器人位形空间的运动控制。欠驱动机构<sup>[26]</sup>在运动学水平上表现出运动的不确定性,但通过动力学水平的非线性控制是确定的。由于减少了驱动器的数量,欠驱动机器人有质量轻、成本低、能耗低等优点,可实现仿生机器人高效、优美的运动。仿生机器人欠驱动是基于动力耦合驱动原理对欠驱动机器人中被动关节的运动进行有效的控制,在空间机器人和水下机器人等灵活性和冗余度高的领域中有广阔的应用前景。但适合自身的特点的控制方法还有待继续摸索。

3) 仿生机构的变胞原理及其结构设计。变胞机构是在机构连续运行中,由有效杆数目变化或运动副类型和几何关系变化引起机构拓扑结构变化,并导致机构活动度变化,但仍保持运行的机构。如壁虎机器人机构在其工作中存在由连续非约束变化导

致的机构变自由度现象。腿机构摆动相时,运动系统开环,机构自由度增多;在支撑相时,机器人脚掌与目标体稳定连接,系统为闭环,自由度减少。若原动件保持数量不变,此时就需要使用变自由度机构以实现对运动的控制。

4) 仿生机构的运动稳定性理论与方法研究。即通过研究扰动对系统运动的影响,判定系统运动状态是否稳定的准则。仿生机器人的稳定性表现为机器人运动的平稳性,如陆地机器人地面运动的抗倾翻能力以及腾空中抗翻转能力、水下机器人抗干扰保持方向稳定性的能力、飞行机器人保持位姿稳定性的能力。目前对仿生机器人静态稳定性判定发展较为完善,动态稳定判定目前处于对静态稳定判定的扩展阶段,有待进一步研究<sup>[27]</sup>。

5) 仿生机构的高承载自重比原理及其结构设计方法研究。仿生机器人的自身质量与承载能力之比制约了它在工业和生活中的广泛应用。目前的仿生机构总能耗功率与承载能耗的比例高,有的高达30:1,为了达到节能减排、节约成本的目的,其机构有待进一步优化。

6) 新型仿生机器人材料的研究及其设计。这些材料既要高强度、高韧性,还要有变形可控等特性。除目前已研制出的形状记忆合金、电致流变流体材料、磁致流变流体材料、电致伸缩材料、磁致伸缩材料、光导纤维和功能凝胶等新型智能材料外,其他新型智能材料的研发也仍将继续。

## 3 结 论

仿生学的应用使得机器人学的研究对象、内容和方法发生了较大的转变,开阔、拓展和发散了科学家们的视野和思维。现有的扑翼飞行器的研究是对未来军事化中无人机和微型飞行器广泛应用的展望;地面移动机器人不仅在军事方面有较好前景,在救援、侦测、工程建设以及改善人民生活方面也将发挥越来越大的潜力;水下机器人的发展则为海洋的开发与研究提供很大可能;仿人机器人在为人类服务、提高生活质量等方面具有较大作为。

仿生机器人研究对机构的要求不再停留在传统的结构形式,冗余驱动、欠驱动、变胞原理等新型驱动形式的出现,以及运动稳定性理论与方法研究、高承载自重比原理及其结构设计,再加上新型仿生机器人材料的研究及其设计,都将成为仿生机构的重要研究内容和研究方向,因而将大大促进仿生机构学的发展。

## 参考文献:

- [1]袁传宓,吴玉璋.仿生学漫谈[M].南京:江苏科学技术出版社,1980:27-28.
- [2]Nick Pornsin-Sirirak T, Tai Yu-Chong, Ho Chih-Ming, et al. Microbat: A Palm-Sized Electrically Powered Ornithopter[J]. The NASA/ JPL Workshop on Biomorphic Robotics, 2000, 14-16: 1-13.
- [3]Nicole Casal Moore. Sensors for bat-inspired spy plane under development[EB/OL]. (2008-03-17). <http://ns.umich.edu/new/releases/6409>.
- [4]小云. 机器人师从蝙蝠 飞行时拍打翅膀[N/OL]. 新民晚报, 2009-07-24(A07). <http://physorg.eefocus.com/article/09-08/1421451250241928.html>.
- [5][佚名]. 中国爱生公司 ASN-211 微型扑翼飞行器形似飞蝶[EB/OL]. (2011-11-16). [http://www.edu.cn/jun\\_shi\\_ke\\_ji\\_1128/20101129/t20101129\\_546148.shtml](http://www.edu.cn/jun_shi_ke_ji_1128/20101129/t20101129_546148.shtml).
- [6][佚名]. 美“纳米蜂鸟”无人机被誉为年度 50 大发明之一[EB/OL]. (2011-11-28). [http://news.xinhuanet.com/mil/2011-11/28/c\\_122346673.htm](http://news.xinhuanet.com/mil/2011-11/28/c_122346673.htm).
- [7][佚名]. 收集情报完成轰炸 机器蝇本领超过 007[EB/OL]. (2002-11-08). <http://www.cctv.com/news/science/20021108/100004.shtml>.
- [8]罗均. 飞吧, 苍蝇机器人[J]. 世界科学, 2008(6): 9-11.
- [9]RoboSwift. Bio-inspired morphing-wing micro aerial vehicle[EB/OL]. (2008-03-20). <http://roboswift.nl/page=design&lang=en>.
- [10][佚名]. 德国研制出蜻蜓机器人[EB/OL]. (2013-04-03). <http://scienceblog.blog.163.com/blog/static/1896850072013330481886/>.
- [11]过客. 加州大学研制出速度远超蟑螂的六腿机器人[EB/OL]. (2013-01-17). [http://www.sxkp.com/kpw/kjbnews/news\\_view.aspnewsid=119974](http://www.sxkp.com/kpw/kjbnews/news_view.aspnewsid=119974).
- [12]EDN. 嵌入式图形系统设计助力救生机器人蜘蛛[EB/OL]. (2008-12-10). <http://www.eepw.com.cn/article/90171.htm>.
- [13][佚名]. 麻省理工学院发布新款机械鱼[EB/OL]. (2009-08-26). <http://www.cnbeta.com/articles/91918.htm>.
- [14][佚名]. 德国费斯托公司所研制“水母”机器人[EB/OL]. (2010-12-07). <http://www.aqsc.cn/101815/103543/103685/104369/182385.html> w=水母 德国.
- [15][佚名]. 蛇形机器人 扭身暗中行[EB/OL]. (2004-04-20). <http://tech.sina.com.cn/other/2004-04-20/1000351560.shtml>.
- [16][佚名]. 美国高校制造出机器蛇 可缠绕树木垂直爬行[EB/OL]. (2010-09-08). <http://tech.enorth.com.cn/system/2010/09/08/005080888.shtml>.
- [17]RobotSky. 酷似螃蟹的英国水下勘察探测机器人[EB/OL]. (2008-03-20). <http://www.robotsky.com/e/doprint/classid=27&id=2993>.
- [18]Hirai K, Hirose M, Haikawa Y, Takenaka T. The Development of Honda Humanoid Robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automations. Leuven: [s. n.], 1998: 1321-1326.
- [19]Yashika S, Ryujin W. The Intelligent ASIMO: System Overview and Integration[C]//IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Lausanne: [s. n.], 2002: 2478-2483.
- [20]Kanehiro F, Kaneko K, Fujiwara K, et al. The First Humanoid Robot That Has The Same Size As A Human And That Can Lie Down And Get Up[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei: [s. n.], 2003: 1633-1639.
- [21]柯文德. 基于人体运动相似性的仿人机器人运动规划关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 2-11.
- [22]陈兵, 骆敏舟, 冯宝林. 类机器人的研究现状及展望[J]. 机器人技术与应用, 2013(4): 25-30.
- [23]谭民, 王硕. 机器人技术研究进展[J]. 自动化学报, 2013, 39(7): 963-973.
- [24]郑仁成. 5-UPS/PRPU 并联机床的冗余驱动研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2006: 8-11.
- [25]何广平, 陆震, 王凤翔. 欠驱动机器人的动力学耦合奇异研究[J]. 航空学报, 2005, 26(2): 240-245.
- [26]陈炜, 余跃庆, 张绪平. 欠驱动机器人研究综述[J]. 机械设计与研究, 2005, 21(4): 22-26.
- [27]夏旭峰, 葛文杰. 仿生机器人运动稳定性的研究进展[J]. 机床与液压, 2007, 35(2): 229-234.

(责任编辑:李艳)