

文章编号: 1002-0446(2007)03-0290-08

仿壁虎机器人研究综述*

王田苗¹, 孟 偲², 裴葆青³, 戴振东⁴

(1 北京航空航天大学机器人研究所, 北京 100083 2 北京航空航天大学宇航学院, 北京 100083
3 北京航空航天大学生物工程系, 北京 100083 4 南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所, 江苏南京 210016)

摘 要: 首先, 详细介绍和分析了国内外仿壁虎机器人的研究现状. 然后, 讨论比较了仿生壁虎机器人所涉及的关键技术的优缺点. 最后, 在前面分析比较基础上对未来的发展趋势进行了预测.

关键词: 仿生机器人; 壁虎; 爬壁

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Summary on Gecko Robot Research

WANG Tian-miao¹, MENG Cai², PEI Bao-qing³, DAI Zhen-dong⁴

(1 Robotics Institute, Beihang University, Beijing 100083 China; 2 School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100083 China;
3 Bioengineering Department, Beihang University, Beijing 100083 China;
4 Institute of Bio-inspired Structure and Surface Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016 China)

Abstract Firstly both the foreign and domestic status of research on gecko robot is introduced and analyzed in detail. Then the key technologies involved are discussed and compared. Finally the future development trends are forecasted based on the previous analysis.

Keywords biorobotics; gecko; wall climbing

1 引言 (Introduction)

机器人不但可以提高工人的生产效率, 还可以代替人类从事乏味、劳累和危险的工作, 甚至完成人类不能胜任的工作, 因而日益受到人们的重视. 随着人类探索太空、建设航天站、开发海洋、军事作战与反恐侦察等任务和需求的增加, 人们对机器人的性能提出了更高的要求. 而在 35 亿年的进化过程中, 生物体发展了灵巧的运动机构和机敏的运动模式, 成为机器人技术创新发展的源泉之一. 仿生机器人就是模仿自然界中生物的精巧结构、运动原理和行为方式等的机器人系统. 科学家们向生物学习, 创造出了众多高性能的仿生机器人, 如机器鱼、机器蛇、机器蝇, 以及各种仿生材料^[1-3].

壁虎是一种可在地面、陡壁、天花板等不同法向面上自由灵活运动的四足动物. 科学家以壁虎的这种运动能力为研究模仿对象, 研制出了各种爬壁机

器人. 爬壁机器人在民用、军事、航天上具有广泛的用途, 因而越来越受到人们的重视. 在民用领域, 爬壁机器人被用来清洗大厦外壁墙面和玻璃、检测舰船船体、检测核密封罐等; 在军事反恐领域, 爬壁机器人可用来进行侦察窃听、研制蛙人等; 在航天领域, 爬壁机器人可用来进行舱外维修等^[4]. 但传统爬壁机器人的吸附原理和移动机理与真实壁虎毫无关系, 其缺点限制了应用环境和工作范围, 而壁虎的吸附原理和移动方式为突破传统爬壁机器人的限制提供了新的思路, 因而成为一个新的研究方向.

目前仿壁虎机器人技术的研究主要分为吸附技术的研究与移动技术的研究, 吸附技术研究主要是围绕研制仿壁虎脚掌的吸附材料展开, 移动技术则主要是模仿生物的灵巧移动方式. 目前, 美国、日本等西方发达国家都在开展仿壁虎机器人方面的研究, 美国处在领先的位置, 但仍处于初步阶段^[2]. 我国也已开展这方面的研究, 其中在壁面清洗方面实

* 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (60535020); 国家杰出青年科学基金资助项目 (60525314).
收稿日期: 2006-05-30

现了爬壁机器人的应用,在壁虎脚掌吸附材料研制上也取得一定成果,但距离国外研究水平仍有一定的差距.

本文首先介绍国内外仿壁虎机器人的研究现状,然后总结仿壁虎机器人的关键技术并进行对比评述分析,最后对仿壁虎机器人的研究发展趋势进行预测展望.

2 国内外仿壁虎机器人研究现状 (Status quo of gecko robot research)

2.1 国外仿壁虎机器人

2.1.1 美国

图 1(a)所示是美国斯坦福大学的一个研究小组在 2006 年开发出的一种仿壁虎机器人,称为 Stickybot^[5]. Stickybot 具有 4 只粘性脚足,每个脚足有 4 个脚趾,趾底长着数百万个极其微小的用于粘附的人造毛发(由人造橡胶制成).每个脚趾都有脚筋,脚筋可以实现脚趾的外翻与展平,如图 1(b)所示.每个脚足上的 4 个脚筋可以联动,从而轻松实现脚足与附着面的最大接触以及脚足粘附材料与附着面的吸附与脱附.从图上分析,壁虎的腿是个四杆机构,依靠一个电机实现腿的前后移动,并借助另外一个电机实现四杆机构平面的转动从而实现抬腿动作.此外,应该另有一个马达实现壁虎脚趾的驱动. Stickybot 从吸附原理、运动形式、机器人外形上都比较接近真实的壁虎.

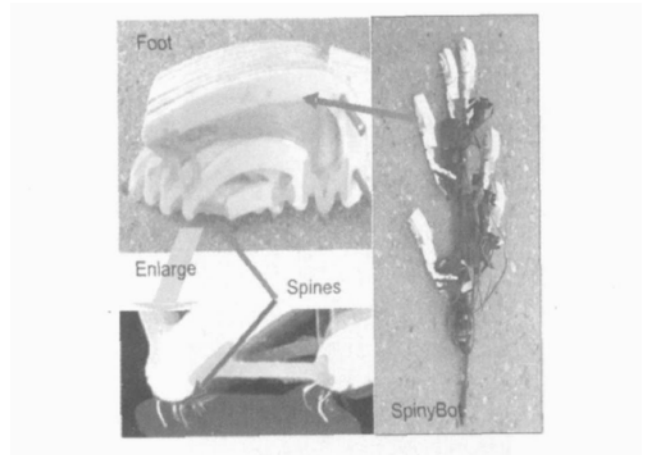
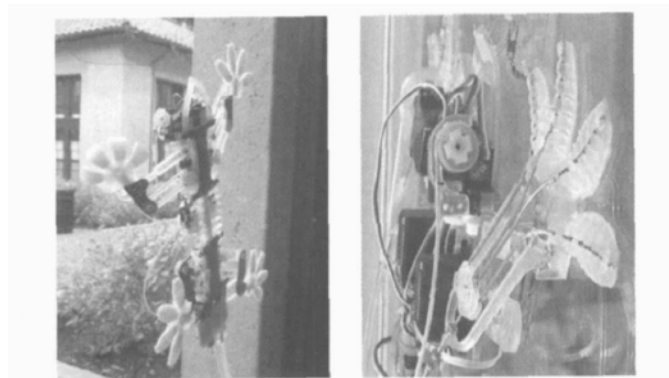


图 2 斯坦福大学 SpinyBot
Fig 2 SpinyBot from Stanford University

CMU (Carnegie Mellon University) 微小型机器人实验室研制了两种结构形式的爬壁机器人,分别如图 3 和图 4 所示^[7]. 图 3 所示 Waaibot 是具有两个行走轮,每个行走轮上具有 3 个吸附足的爬壁机器人,吸附足采用特殊的粘性材料粘附在墙面上. Waaibot 移动方式本质上是轮式移动,前进和倒退通过改变两个轮子的转动方向即可实现. 支撑足与轮毂是球销副连接,既可以在行进时围绕足踝轴转动,也可在转弯时围绕足中心轴旋转. 转弯的时候一边的轮子不转,通过另一边的轮子转动来实现机器人的转弯. 由于采用滚动方式,因而可以实现不同法向面的过渡,即从地面可自主爬到竖直面上. Waaibot 机构比较巧妙,用两个足式轮子实现了爬行、转弯等运动,还可以实现墙面过渡. 缺点是采用的粘性材料对壁面的要求较高,稳定性不是很好,吸附面积有限,载重能力不强.



(a) Stickybot (b) Stickybot 的脚足

图 1 斯坦福大学的 Stickybot

Fig 1 Stickybot from Stanford University

斯坦福大学的另一个研究小组曾开发出模拟蟑螂的爬壁机器人 SpinyBot^[6],如图 2 所示. SpinyBot 的脚上长有极细小的倒钩刺,通过在粗糙壁面上“扣”住凸缘实现爬壁,适合在水泥壁面、砖墙面上作业.

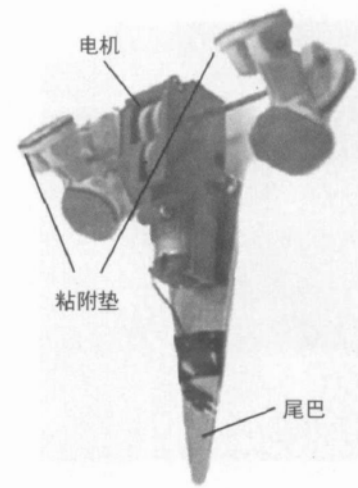


图 3 CMU 的三足 Waaibot

Fig 3 Tri-foot Waaibot from CMU

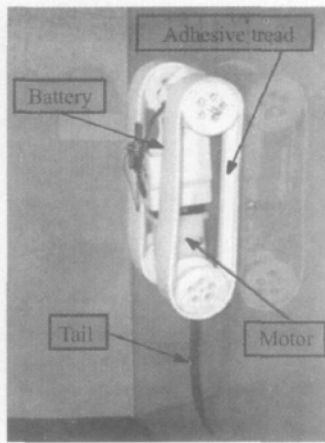


图 4 CMU 履带式爬壁机器人
Fig 4 Tracked climbing robot from CMU

图 4所示是 CMU 开发的履带式壁虎机器人,其履带是由特殊的粘性材料制作的,可以粘在墙面上,使得机器人在墙面上的行走有如履带机器人在地面上的行走.其移动就是履带传动,通过两头动力轮的转动实现履带在墙面上的移动,在前端的履带被压在墙面上实现粘附的同时后面的履带被拉起.履带式爬壁机器人粘附面积较大,可以承受较大的负载,也可从地面过渡到垂直墙面上.但由于履带机器人转弯时存在滑动摩擦,会破坏吸附,因而不能实现转弯.

加州大学伯克利分校与 Robot 合作开发了 Mecho-Gecko 壁虎机器人^[8],如图 5 所示. Mecho-Gecko 是两轮驱动的四轮式机器人,驱动轮上长有三足,通过在足上预装粘合剂和剥离粘合剂来实现对壁面的吸附.其结构相对比较复杂.他们后面又设计了 6 腿的壁虎机器人 Hexa-Gecko^[9].

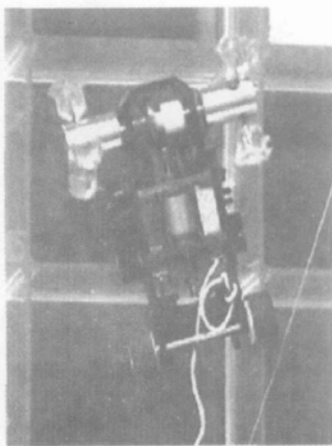


图 5 加州大学伯克利分校的 Mecho-Gecko
Fig 5 Mecho-Gecko from Berkeley

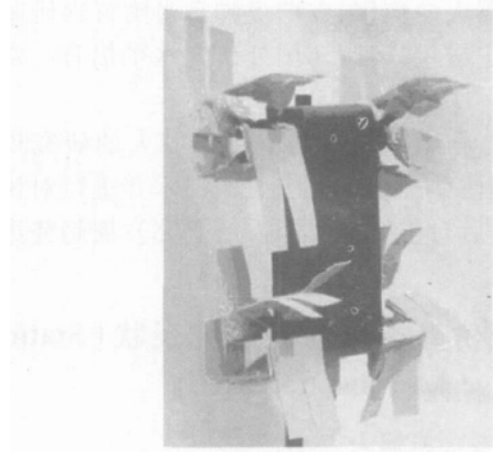


图 6 MiniWhegs
Fig 6 MiniWhegs

美国克利夫兰 Case Western Reserve University 设计了一种轮腿式爬壁机器人 MiniWhegs,如图 6 所示^[10]. MiniWhegs 的机构就像一辆汽车有 4 个车轮,每个车轮上面装有由具有粘性的聚合物材料制成的叶片.同一条轴上的两个轮子的步调是错开的,以保证在行动的时候有一边的轮子能够粘在墙面上. MiniWhegs 只能向前爬行,不能实现后退、转弯等动作,所以它只是作为一种爬行材料的验证型机器人,要实现实际的用途还有待改进.

2.1.2 日本

为了实现各种法向面的灵活过渡,东京工艺研究院和 IsikawajimaHarima 重工业有限公司联合设计开发了“忍者”机器人^[11],其外形和运动形式如图 7 所示.“忍者”机器人的吸附方式采用的是一种被称作 VM (汽门复合管理)的高功效真空吸盘,褶皱或是粗糙的墙壁都可以吸附.它有 4 条腿,每条腿上装有一个真空吸盘的足,每条腿都有 3 个自由度,可以往 3 个方向挪动.该机器人可以很方便地实现前进后退,也可以横向移动,也很容易实现墙面过渡,如图 7 所示.它的移动方式是与移动方向同侧的两条腿吸附在墙上,另外两条腿移动,然后交换,如此交替实现移动.“忍者”3 自由度的平行机构使得它能承受高负荷,但它的吸附装置和移动机构也使得机器人的自身重量很大,四条腿的控制也很复杂.

日本三菱重工业公司正在销售的一种磁性爬壁喷涂机器人^[12],可以吸附在 20 mm 以上厚度的建筑物上,磁力可达 2000 kgf 左右,并能沿各种磁性结构运动,如钢筋墙壁、天花板,甚至在潮湿的壁面运动,速度可达 10 m/min.

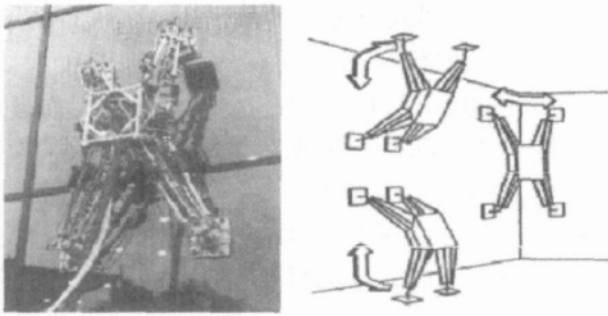


图 7 “忍者”爬壁机器人
Fig 7 Climbing robot NNJA

日本应用技术研究所研制出一种车轮式磁吸附爬壁机器人^[13]. 它可以吸附在各种大型构造物如油罐、球形煤气罐、船舶等的壁面, 代替人进行检查或修理等作业. 这种爬壁机器人靠磁性车轮对壁面产生吸附力, 其主要特征是: 行走稳定, 速度快, 适用于各种形状的壁面, 且不损坏壁面的油漆. 1989年, 日本东京工业大学的宏油茂男研究开发了吸盘式磁吸附爬壁机器人, 吸盘与壁面之间有一个很小的倾斜角度, 这样吸盘对壁面的吸力仍然很大, 每个吸盘分别由一个电动机来驱动, 与壁面线接触的吸盘旋转, 爬壁机器人就随着向前移动, 这种吸附机构的吸附力可以达到很大^[14].

2.2 国内壁虎机器人研究现状

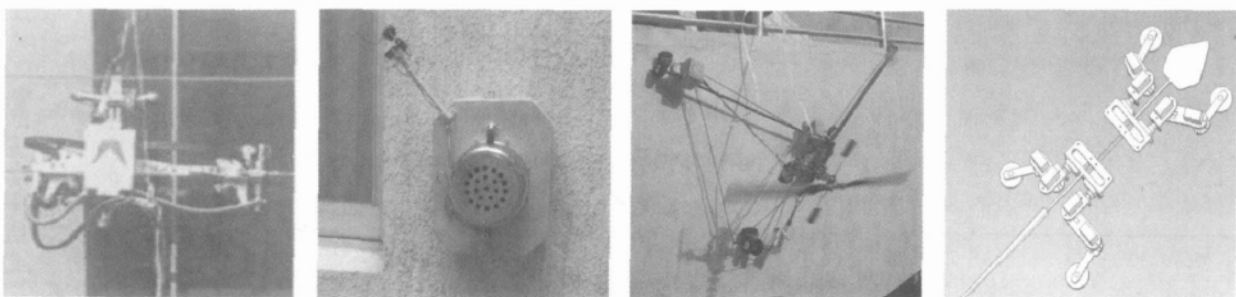
国内对仿壁虎机器人技术的研究主要是针对爬壁机器人展开的, 这方面影响比较大的主要有哈尔滨工业大学与北京航空航天大学, 中国科学院沈阳自动化所机器人开放实验室^[15]与上海大学也有这方面的研究. 他们的研究主要都是基于负压吸附原理. 最近, 北京航空航天大学与南京航空航天大学合作展开了基于壁虎吸附原理与运动的仿壁虎机器人研究.

哈尔滨工业大学是我国较早开展爬壁机器人研究的单位之一. 他们开发的 CLR-2 型壁面清洗爬壁机器人 2000 年在北京国贸大厦正式投入使用. CLR-2

采用圆形的吸盘进行吸附. 最近哈尔滨工业大学李满天等人开始了微小型爬壁机器人技术的研究, 研制出双足尺蠖爬壁机器人. 该爬壁机器人采用负压吸附方式, 由微型泵抽出吸盘中的空气, 可在砖墙面上实现吸附. 尺蠖机器人可以实现不同法向平面的过渡.

上海大学谈士力等人设计开发了面向球形存储罐检修的球面移动爬壁机器人^[16], 它采用真空吸附方式和腿足式移动机构, 可以适应不同曲率半径的曲面, 并可跨越 300 mm 高的障碍.

北京航空航天大学机器人研究所也是国内较早开展爬壁机器人技术研究的单位之一, 其研制开发的“蓝天洁士”系列爬壁清洗机器人(如图 8(a)所示)已向上海大学图书馆、国家大剧院、北京西站等单位销售多台.“蓝天洁士”以 2 个紧密相连的、成十字交叉状的无杆气缸构成其主体. 机器人可以在 X、Y 两个方向运动. 在 X 和 Y 气缸的顶端有 4 个 Z 向气缸用以支持和升降机器人的主体. 各个 Z 向气缸下端分别固连有 2 个真空吸盘, 使得机器人能够吸附于附着面^[17]. 该机器人机构简单, 可自主运动, 但缺点是气缸位置的精确定位比较困难. 图 8(b)所示是北京航空航天大学机器人所 2005 年研制的微小型爬壁机器人, 大小只有 270 mm × 270 mm, 自重 3.2 kg 吸附力可达 15 kgf 该机器人采用负压吸附方式, 由中央高速旋转电机将内腔抽成真空, 用弹性橡胶作裙边密封, 可以适应具有不超过 2 cm 宽浅沟的粗糙壁面. 采用轮式移动, 通过调节两侧车轮的转速实现机器人的前进、后退和转弯. 图 8(c)所示是北京航空航天大学机器人所 2006 年研制的正压贴附爬壁机器人, 它基于直升机原理, 将螺旋桨总距设为负值从而产生压力, 将机器人压附在墙面上. 这种正压机器人由于采用空气压力贴附在壁面上, 所以对壁面粗糙度和材料均无要求.



(a) 蓝天洁士 (b) 小型爬壁机器人 (c) 正压贴附机器人 (d) Geckobot 虚拟样机

图 8 北京航空航天大学的爬壁机器人
Fig 8 Climbing robots from Beihang University

图 8(d)所示是在国家自然科学基金重点项目支持下北京航空航天大学与南京航空航天大学合作设计的仿壁虎机器人虚拟样机,目前正在加工过程中.该机器人运动机构是仿生物壁虎设计,脚掌将采用南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所研制的仿壁虎脚掌粘性材料.

国内其它一些研究机构还研究了轮腿轮换式负压爬壁机器人^[18]、磁吸附履带式爬壁机器人^[19]、被动负压履带式爬壁机器人等.

3 壁虎机器人关键技术 (Key technologies of gecko robot)

目前,仿生机器人研究的两个主要方向是运动机理的研究和行为方式的研究^[20].壁虎机器人应该是能在各种壁面与天花板上灵活运动的机器人,它主要模仿的是壁虎的吸附能力和运动能力.

3.1 吸附技术

传统爬壁机器人有真空吸附和磁吸附两种吸附形式,真空吸附方式具有不受壁面材料限制的优点,但当壁面凸凹不平时,容易使吸盘漏气,从而使吸附力和承载能力明显下降.磁吸附法可分为电磁体和永磁体两种,电磁体式维持吸附力需要电力,但控制较方便.永磁体式不受断电的影响,使用中安全可靠,但控制较为麻烦.磁吸附方式对壁面的凸凹适应性强,且吸附力远大于真空吸附方式,不存在真空漏气的问题,但要求壁面必须是导磁材料,因此严重地

限制了爬壁机器人的应用环境.

近年来,科学家研究较多的是一种叫作干性粘合剂 (dry adhesive)的吸附技术并已获得较大进展.干性粘合剂实际是一种人造仿生壁虎脚.生物科学家发现,壁虎每个脚趾上有许许多多褶皱,每个褶皱上密布着无数根刚毛,而每一根刚毛的尖端又都分布着数千个更加微小的衬垫,这种衬垫在壁虎的每一个脚趾上达数十亿个之多,如图 9所示.如此精巧的衬垫,使壁虎脚掌和物体间的接触几乎接近分子水平,于是两种不同分子之间的吸引力被壁虎巧妙充分地利用,这种特殊的黏着力是由壁虎脚底大量的刚毛与物体表面分子之间产生的“范德瓦尔斯力”累积而成的.根据计算,一只大壁虎的 4 只脚产生的总作用力压强相当于 10 个大气压.壁虎就是通过“范德瓦尔斯力”牢牢地吸附在墙面上.科学家在生物壁虎原型吸附的功能原理和作用机理的基础上,探索出一种与壁虎脚趾表面结构相近的、经物理改性的极性高分子材料 (人造仿生壁虎脚干性粘合剂),并应用 MEMS 加工技术,设计制作出模拟壁虎脚趾的吸附装置,该吸附装置能适应各种材质 (如玻璃、粉墙和金属等) 和任意形状的表面 (如平面、柱面、弧面和拐角等).但目前干性粘合剂的附着能力比起真实壁虎还是相差很多,加工不易但易损耗.

此外还有正压吸附方式,它能适应各种表面,但还有待于进一步深入研究.

各种吸附方式的优缺点比较见表 1.

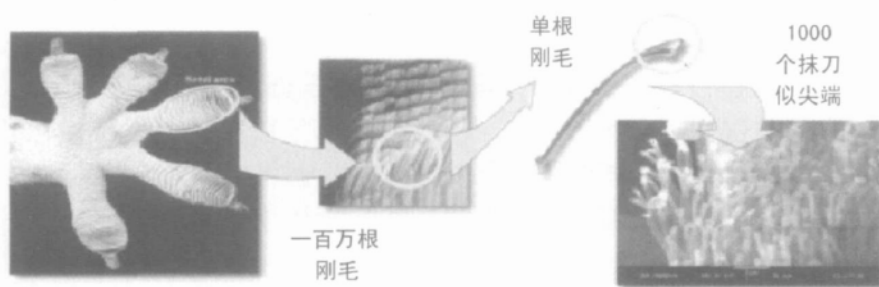


图 9 壁虎脚掌及刚毛
Fig 9 Foot and seta of gecko

表 1 吸附方式优缺点比较

Table 1 Comparison of different absorption methods

吸附方式	优 点	缺 点
负压吸附	对壁面材料无要求, 负载能力较强, 技术相对成熟	壁面粗糙度要求高, 需要真空泵, 有噪音, 太空中不适用
正压贴附	适应各种壁面	技术尚不成熟, 有噪音, 太空中不适用
电磁吸附	控制方便, 负载能力强, 无噪音	壁面需导磁, 耗电
永磁吸附	不耗电, 负载能力强, 无噪音	壁面需导磁, 控制较繁琐
干性粘剂	适应各种壁面, 无噪音	加工较难, 易损耗, 技术尚不成熟

3.2 移动技术

目前,壁虎机器人的移动方式主要是车轮式、履带式、导轨式、腿足式和混合式。

车轮式移动速度快、控制灵活,但维持一定的吸附力较困难,越障能力差;履带式对壁面适应性强,着地面积大,但不易转弯,越障能力差。导轨式移动也较快,具有一定的越障能力,但不能转向。腿足式移动灵活,地形适应能力强,具有较高的越障能力和不同平面之间的过渡能力,但移动速度慢、控制复杂。混合式一般采用轮足混合,兼具车轮式移动和腿足式移动的优点,但控制和结构也更为复杂。

目前,常见的腿足式机器人以两足式、四足式、

六足式应用较多。结构主要为缩放型机构、四连杆机构、多关节串联机构、平行杆机构、并联机构和摆动缩放机构。在微型爬壁机器人中以四连杆机构和并联机构应用较多。

华中科技大学设计出一种含有弹性元件的缓冲型腿机构(如图 10(a)所示),以解决机器人在动态行走时的冲击以及由此产生的振动^[21]。

图 10(b)所示并联机构是一种并行三连杆腿机构,它由 3 个驱动器直接驱动机器人腿的 3 个自由度,大腿、小腿的抬放和侧向转动。并联机构负载能力强,可以实现爬壁机器人的全方位运动,所以具有较好的应用前景,但控制系统的设计较为复杂。

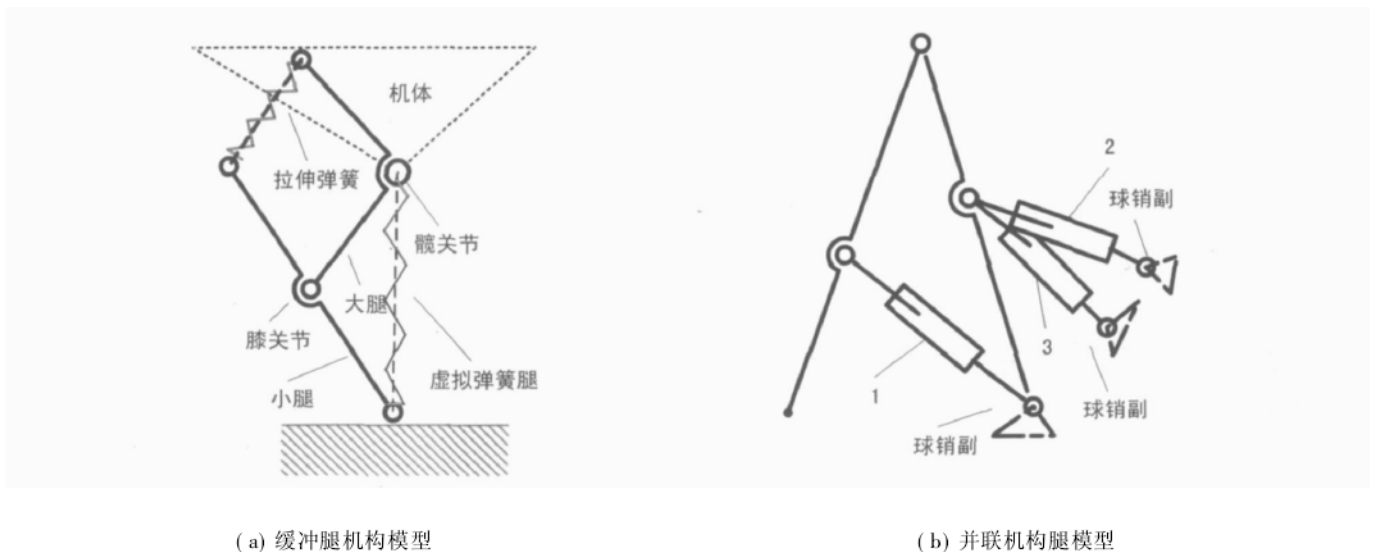


图 10 两种腿机构模型
Fig 10 Two models of leg mechanism

3.3 能源供给

常规机器人能源供给一般采用有缆方式或者采用电池供电。

有缆方式的优点是电力供应充足,缺点是电缆会对机器人的移动范围形成约束,并且电缆重力会对机器人形成一定影响。

电池供电可以省去电缆,但其能量有限,而且电池随着体积的缩小供电性能急剧下降,能量密度有待进一步提高。

此外,新的能源供给方式也在积极探索之中。比如,通过微波对微机器人提供能量和控制信号就是一种较为理想的方法,日本 DENSO 公司已经较为成功地将微波技术应用到了一台由 8 层 PZT 驱动的无线微型腿足式管内机器人上^[22]。

3.4 驱动方式

目前,常规的壁虎机器人驱动装置主要是气泵

和电机。

对于微小型壁虎机器人,传统驱动方式其性能随体积减小而迅速降低,且导致传动系统复杂化,引起结构复杂、传动误差增加、摩擦增大、重量加大等一系列问题,因而难以适用。针对微小型机器人,要采用新材料、新工艺开发出新型的微驱动器,如目前已有直线驱动电机、压电陶瓷(PZT)、超声电机、形状记忆合金(Shape Memory Alloy, SMA)等新型驱动器出现,其中以形状记忆合金、超声电机驱动器最引人注目。

(1) SMA 驱动器

SMA 的主要特征是具有形状记忆效应,即某些被变形的金属具有受热后恢复其原来形状的能力。SMA 驱动器具有以下优点:①功率/质量比大;②结构紧凑、轻巧,可直接输出直线运动;③动作柔顺、适应性强,可感知温度和位移的变化;④无噪音、无污

染; ⑤易于控制, 可通过控制电压或通电时间来实现加热控制. SMA 的缺点是响应慢、位移小、寿命短、退化和耗电. 但目前这些不足已基本得到了很好的解决. 如美国 NanoMuscle 公司开发的 SMA 驱动器, 每秒钟可以往复运动数次, 最大行程可达到自身长度的 13%, 可连续往复运动数百万个周期, 仅仅需要几百毫安的供电. 所以 SMA 驱动器在微型爬壁机器人上将具有较好的应用前景.

(2) 超声电机

超声电机又称压电马达, 是采用压电材料驱动的一种新型微特电机, 它利用逆压电效应使定子机体产生柔性波动, 进而在定子表面质点的振动摩擦作用下将振动能耦合成转子的力矩输出. 超声电机具有体积小、质量轻、结构简单紧凑、定位精度高(可达 μm 量级)、响应速度快(可达 μs 量级)、低转速、大力矩输出等特点. 由于超声电机具有众多的优点, 使得它将在微型机器人上具有很好的应用前景. 但由于超声电机对于驱动信号有着较高的要求, 所以控制相对复杂.

4 壁虎机器人发展趋势 (Trends of gecko robot)

经过对壁虎机器人国内外现状的分析和壁虎机器人各类关键技术优缺点的比较, 结合机器人技术发展的总体趋势, 我们认为壁虎机器人的发展有如下趋势:

• 吸附方式将越来越多地采用干性粘合剂

负压吸附方式和磁吸附方式技术发展已经相对成熟, 并已有商用化产品出现. 但它们的缺点也是显而易见的. 干性粘合剂作为一种仿生智能材料, 能够适应各种材质壁面, 并且没有噪音. 虽然目前其吸附能力还比较差, 但相信随着 MEMS 加工技术和新材料的发展, 人造壁虎脚掌的性能将会有明显提升. 目前, 西方发达国家都很重视对壁虎脚掌仿生材料的研究, 我国南京航空航天大学也已经开展相关方面的研究.

• 向微型化发展

科学家预言, 21 世纪的尖端技术之一是微型机器人. 仿生微型机器人可用于小型管道检测作业, 可进入人体肠道进行检查和实施治疗而不伤害人体, 也可以进入狭小的复杂环境进行各种作业. 因此, 壁虎机器人的小型化和微型化是一个发展趋势.

• 移动方式用腿足式

在移动机器人中, 轮式和履带式移动方式已获

得广泛的应用, 但是腿足式移动方式具有轮式和履带式所没有的优点. 腿足式移动方式的机器人可以相对较容易地跨过比较大的障碍(如沟、坎等), 并且机器人的足所具有的大量的自由度可以使机器人的运动更加灵活, 对凸凹不平的地形适应能力更强. 正是由于腿足式移动结构多样、运动灵活, 适应于各种形状的壁面, 而且能够跨越障碍物, 因此足式结构将在爬壁机器人上, 尤其是在微小型爬壁机器人上, 有着较好的应用前景.

• 生物壁虎机器人

生物机器人是借助于电子信息技术刺激来控制动物神经信号, 从而达到对动物的运动或某些行为的人为控制目的的技术. 日本和美国 DARPA 都已设立了生物机器人研究计划^[23, 24], 而我国南京航空航天大学也已经展开了生物壁虎机器人技术研究并已取得初步的成果^[25]. 通过在壁虎上安装载荷并控制壁虎来完成的任务将在能源供给、运动灵活性、隐蔽性、机动性和适应性方面较仿生壁虎机器人具有更明显的优势.

5 结论 (Conclusion)

本文首先重点介绍了美国、日本和国内仿壁虎机器人的研究现状, 然后讨论比较了仿生壁虎机器人所涉及的关键技术尤其是吸附技术和移动技术的优缺点, 最后在上述分析比较基础上对未来的发展趋势进行了预测展望.

总体来说仿壁虎机器人朝着微型化、腿足式移动化和利用仿生材料粘合剂进行吸附的方向上发展, 其中美国在这方面的研究处于领先地位.

在仿生壁虎机器人发展的同时, 生物壁虎机器人也将成为另外一个新的研究发展方向.

参考文献 (References)

- [1] 张秀丽, 郑浩峻, 陈慧, 等. 机器人仿生学研究综述 [J]. 机器人, 2002, 24(2): 188-192
- [2] 吉爱红, 戴振东, 周来水. 仿生机器人的研究进展 [J]. 机器人, 2005, 27(3): 284-288
- [3] 许宏岩, 付宜利, 王树国, 等. 仿生机器人的研究 [J]. 机器人, 2004, 26(3): 283-288
- [4] VieArtificielle.com. Waalbot ou le lézard Gecko robotisé [EB/OL]. <http://www.vieartificielle.com/article/index.php?id=0713>
- [5] 新浪科技. 美国开发出壁虎式机器人 可吸附在墙上行走 [EB/OL]. <http://tech.sina.com.cn/d/2006-05-19/1846947007.shtml> 2006-05-19
- [6] RiSE. SpinyBot Pages [EB/OL]. <http://bcm1.stanford.edu/twiki/bin/view/Main/SpinyBot>

- [7] Menon C, Murphy M, Sitti M. Gecko inspired surface climbing robots [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004. 431–436.
- [8] Full R J. Biological Inspiration from the Poly-PEDAL Laboratory [EB/OL]. <http://polypedal.berkeley.edu/wiki/bin/view/Poly-PEDAL/AboutRobotics>
- [9] Full R J. Using biological inspiration to build artificial life that locomotes [A]. Proceedings of the International Symposium on Evolutionary Robotics from Intelligent Robotics to Artificial Life. Lecture Notes in Computer Science, vol. 2217 [C]. Berlin, Germany: Springer, 2001. 110–120.
- [10] Daltorio K A, Gorb S, Peressadko A, *et al*. A robot that climbs walls using microstructured polymer feet [A]. Proceedings of the 8th International Conference on Climbing and Walking Robots [C]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2006. 131–138.
- [11] Cepolina F, Micheli R C, Razzoli R P, *et al*. Gecko: a climbing robot for walls cleaning [A]. Proceedings of the 1st International Workshop on Advances in Services Robotics [C]. <http://www.dinec.unige.it/PMAR/pages/download/papers/zoppil1.pdf>, 2003.
- [12] 王俊玲. 磁性爬壁喷涂机器人 [J]. 机电产品市场, 2002, (1/2): 23.
- [13] 潘沛霖, 韩秀琴, 赵言正, 等. 日本磁吸附爬壁机器人的研究现状 [J]. 机器人, 1994, 16(6): 379–382.
- [14] 肖立, 佟仕忠, 丁启敏, 等. 爬壁机器人的现状与发展 [J]. 自动化博览, 2005, 22(1): 81–82, 84.
- [15] 唐宗军, 陈震, 董再励, 等. 一种全方位移动爬壁机器人系统设计 [J]. 机械工程师, 2006, (1): 33–35.
- [16] 谈士力, 王建成, 苏建良, 等. 球面移动机器人机构研制 [J]. 机床与液压, 2003, (2): 19–22.
- [17] 王巍, 宗光华. 气动擦窗机器人的控制和环境检测 [J]. 液压与气动, 2001, (1): 4–7.
- [18] 李曙生. 具有轮换移动机构的爬壁机器人研究 [J]. 泰州职业技术学院学报, 2002, 2(3): 14–17.
- [19] 张俊强, 张华, 万伟民. 履带式爬壁机器人磁吸附单元的磁场及运动分析 [J]. 机器人, 2006, 28(2): 219–223.
- [20] 迟冬祥, 颜国正. 仿生机器人的研究状况及其未来发展 [J]. 机器人, 2001, 23(5): 476–480.
- [21] 余联庆, 吴昌林, 马世平. 基于仿生研究的步行机缓冲型腿机构设计 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2005, 33(6): 105–107.
- [22] 谈士力, 郭成. 微型爬壁机器人研究的关键技术 [J]. 机床与液压, 2005, (11): 4–6, 11.
- [23] Tahadoue E. Japan's latest innovation: A remote control roach [N]. Associated Press, 2001–07.
- [24] Biological sciences [EB/OL]. <http://www.darpa.mil/dso/thrust/tech.htm>.
- [25] 郭策, 戴振东, 孙久荣. 生物机器人的研究现状及其未来发展 [J]. 机器人, 2005, 27(2): 187–192.

作者简介:

王田苗 (1960-), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 微小型机器人, 医疗机器人, 嵌入式机电控制.

孟 偲 (1977-), 男, 博士, 讲师. 研究领域: 智能控制, 仿生机器人.

裴葆青 (1970-), 男, 博士, 讲师. 研究领域: 仿生力学, 机构分析.

(上接第 289 页)

- [41] Thrun S. A probabilistic on-line mapping algorithm for teams of mobile robots [J]. The International Journal of Robotics Research, 2001, 20(5): 335–363.
- [42] Yuen D C K, MacDonald B A. An evaluation of the sequential Monte Carlo technique for simultaneous localization and map-building [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003. 1564–1569.
- [43] Kantor G, Singh S. Preliminary results in range-only localization and mapping [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002. 1818–1823.
- [44] Rekleitis I, Dudek IG, Milios E. Probabilistic cooperative localization and mapping in practice [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003. 1907–1912.

作者简介:

余洪山 (1980-), 男, 博士生. 研究领域: 移动机器人导航控制, 机器视觉等.

王耀南 (1957-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 智能机器人, 智能信息处理和智能控制等.