

# 微小机器人的移动方式

李 章亚男, 龚振邦

(上海大学精密机械工程系, 上海 201800)

**摘要:**微小机器人是微机电系统研究开发的重要分支,各种微小机器人的研究成果不断涌现。受自身尺寸和作业空间的限制,微小机器人难以采用常规机器人的驱动器、传动机构和执行机构。根据移动方式的不同,将微小机器人分为腿足式、轮式、蠕动式和游动式等类型。讨论了各种移动类型的例子,分析研究了它们新颖的驱动机构。认为驱动器的微型化是实现微小机器人的关键,高效合理的驱动方式可降低对微小驱动器的要求。

**关键词:** MEMS; 微小机器人; 移动; 驱动

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** A

## 1 引言

MEMS(Micro Electro Mechanical System)技术是一项面向 21 世纪的高新技术,受到了许多国家的政府部门、学术界和工业界的高度重视<sup>[1]</sup>。目前开展研究较多的属美日两国,美国对 MEMS 技术前沿的研究比较积极,而日本则把小型和微型系统结合起来的混合系统作为主要发展目标,因为它比纯微型系统更接近使用,也易于实现。

微小机器人是 MEMS 研究开发的重要分支。微细加工技术和微型机械电子产品的出现为微小机器人的产生奠定了基础,各种微小机器人的研究成果不断涌现,它已成为举世瞩目的重大科技发展方向。微小机器人不可简单理解为普通机器人的微小化。微机器人学是一个多学科交叉的前沿学科,它以机械电子技术为基础,还涉及到化学、计算机科学、材料科学、生物学、通信和自动控制等许多领域<sup>[2]</sup>。目前国际上对微机器人还没有统一的定义,日本的“微型机器人发展调查委员会”认为微机器人是“在机构的全部或其一部分中所包括的小型运动机构在集成度和密集度方面均比过去高得多的机器”。

微小机器人能进入人所不及的狭小空间内作业,又不扰乱周围环境,在工业、信息处理、通讯、航空航天、航海、医学与生物工程、农业、家庭服务

和保安等领域有着潜在的广阔的应用前景。由于受自身尺寸和作业空间的限制,微小机器人难以采用常规机器人的驱动器、传动机构和执行机构。目前,国内外已有许多微小移动机器人的样机问世,它们都采用了新颖的驱动方式和移动技术。

## 2 微小机器人的移动方式

根据移动方式的不同可将微小机器人分为腿足式、轮式、蠕动式和游动式等类型。

### 2.1 腿足式微小机器人

这类微小机器人用腿足与移动表面接触,通过腿足与表面的相互作用产生驱动力或保证机器人移动。

中国科技大学开发了电磁铁驱动的腿足式跳跃微小机器人<sup>[3]</sup>。机器人的结构如图 1 所示,它的本体和脚部通过弹簧相连,脚部用铁磁性材料做成,在本体上固定有两个电磁铁,在脉冲电压的作用下分别用来控制两只脚按一定时序动作。在起跳阶段(图 1a),脚 1 受电磁铁的吸引后产生弹力,将机器人本体的左部弹起,此时机器人可以看做是以脚 2 为支点的转动;在腾空阶段(图 1b),脚 2 也受到电磁力吸引产生弹力,使本体右部也弹起,此时机器人的两脚都已弹起,本体处于空中,由于脚 2 弹起前本体已向右倾斜,因此脚 2 的弹力指向右上方,所以本体在水平和垂直方向都

有速度,处于抛体运动,同时本体还有一个图示方向的转动;在着地阶段(图 1c),本体在空中运动一段时间后,脚 1 开始着地,此时本体可以看做是以脚 1 为支点的转动,当脚 2 也着地后,就进行重新回到起跳阶段,进行下一次循环。

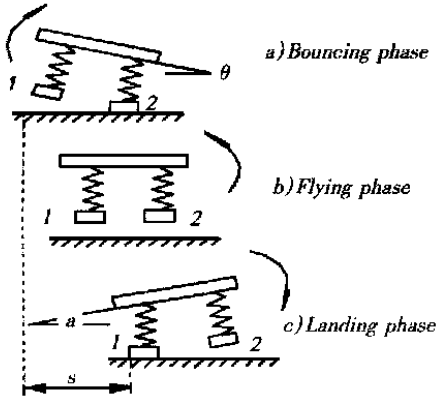


Fig. 1 Plane motion of legged jumping microrobot actuated by electromagnet

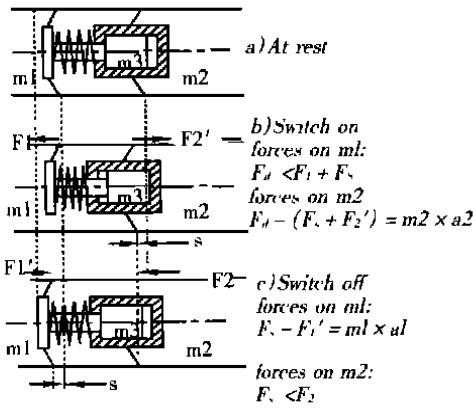


Fig. 2 Legged in-pipe microrobot actuated by electromagnet

上海大学研制出了电磁驱动腿足式管内移动微小机器人<sup>[4]</sup>。图 2 所示为机器人的移动示意图。其主要部件为:与芯柱衔铁  $m_3$  相连的配重块  $m_1$  和电磁铁本体  $m_2$ , 前后两组支撑脚, 以及位于  $m_1$  与  $m_2$  之间的螺旋弹簧。支撑脚均匀分布在机器人的外缘, 并与管壁呈一定夹角布置。电磁铁受激振动时, 电磁吸引力与弹簧力相互作用, 产生往复变形并借助支撑脚与管壁的摩擦, 促使微小机器人沿管壁移动。最初, 电磁线圈失电时(图 2a), 电磁吸力  $F_d$  为 0,  $m_1$  与  $m_2$  之间距离最大; 当对电磁铁通电时(图 2b),  $F_d$  作用于芯柱衔铁,  $F_d$  大于  $m_2$  所受的弹簧力  $F_s$  和摩擦阻力  $F_2$ ,  $m_2$  向左移动; 电磁铁失电后(图 2c),  $F_s$  大于  $m_1$  所受的摩擦阻力  $F_1$ ,  $m_1$  向左移动, 从而整个微小机器人向左

移动了一步。在水平管内最大移动速度为 8.4mm/s, 在垂直管内为 6.6mm/s。日本的 NTT 多学科研究实验室开发出一种电磁力驱动的平面移动腿足式微小机器人<sup>[5]</sup>, 其原理结构与上例类似, 只不过电磁铁产生的不是吸引力, 而是排斥力, 弹簧不是被压缩, 而是被拉长。采用这类结构的机器人只能单向移动, 不能反向移动。

日本 DENSO 公司研制出了压电元件驱动的腿足式管内微小机器人<sup>[6]</sup>。微机器人由压电元件、配重和支撑腿组成, 该微机器人是根据惯性冲击运动的原理(由于惯性力与最大静摩擦力的大小关系发生变化而产生运动)设计的。图 3 所示为机器人的移动示意图。合理配置本体和配重的质量, 再用一定频率, 一定幅值的锯齿波电压作用于压电元件, 就可实现微小机器人在管道内的前后移动。DENSO 公司先用层叠式压电元件作为驱动器, 做出的微机器人本体直径 5.5mm, 长 20mm, 自重 1g, 移动速度为 6mm/s, 可在  $\varnothing 10$ mm 的管道内作水平、垂直运动。后来 DENSO 公司用双压电晶片对其进行了改进。

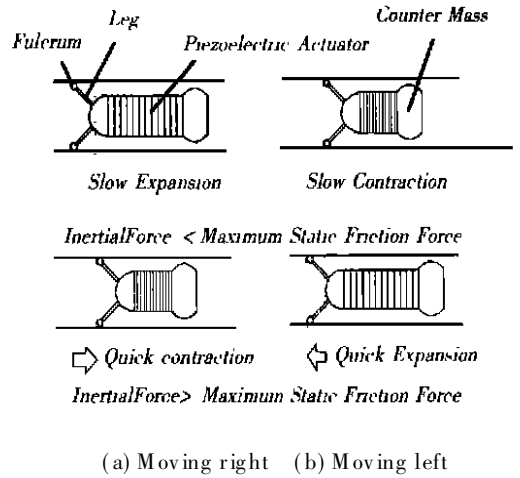


Fig. 3 Legged in-pipe microrobot actuated by PZT

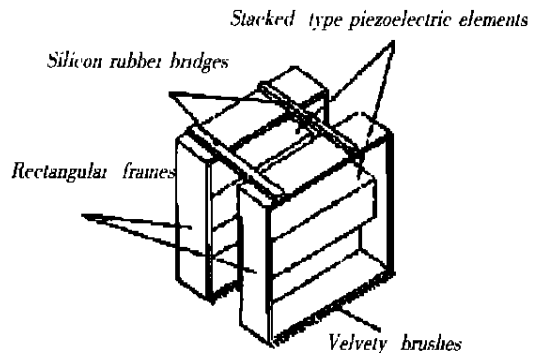


Fig. 4 Structure of legged microrobot made by MEITEC

日本 MEITEC 公司研究出压电晶体驱动的平面移动微小机器人<sup>[7]</sup>。如图 4 所示, 该机器人本体为用弹性材料连接起来的两个矩形框架, 长、

宽、高均不超过 10mm。每个框架内侧粘有压电晶体，框架底面粘有毛足(绒毛刷)。当向压电晶体施加一定频率的波形信号时，压电晶体以很高频率伸长、缩短，使框架发生振动变形，振动传递到底部的毛足，使其与移动表面发生相互作用而驱动微机器人运动，最高移动速度可达 100mm/s。METEC 公司还根据将压电晶体的振动传递到足端驱动本体运动的同样原理开发了一种细小管内移动的腿足式微机器人<sup>[8]</sup>。

腿足式微机器人除了用电磁铁、压电晶体作驱动器外，还可用形状记忆合金(SMA)来驱动<sup>[9]</sup>。

### 2.2 轮式微机器人

轮式微机器人通过轮子与相对移动表面接触，大多数轮子用来产生驱动力。

日本东芝公司研制出一种平面移动微机器人用于参加微机器人迷宫竞赛<sup>[10]</sup>。其结构如图 5 所示，机器人有 4 个轮子，驱动器为两个特制的超小型电机，电机一端为输出轴，装有驱动轮，另一端有一根与输出轴同轴的固定轴，一个轮子通过轴承空套在固定轴上，驱动轮分别布置在两个电机的不同端。采用这样的结构，不需专门的转向机构，就可实现机器人的灵活转向。譬如，要使机器人直线移动，只须两个微电机同向转动；要使机器人原地转动，只须两个微电机反向转动；要使机器人向右前方运动，可使两个电机正向转动，前轮转速小于后轮转速。微电机直径 3.8mm，长 7.5mm，微机器人长、宽、高均在 10mm 以内，重 2g，轮子直径 4mm。变频控制速度可达 300mm/s，爬坡能力 15°。日本香川大学也开发出一种轮式微机器人，其移动原理与东芝公司的样机类似，只不过取消了空套的自由轮，而将驱动轮的宽度加长从而与移动表面的接触线加长，使车体不易倾倒。

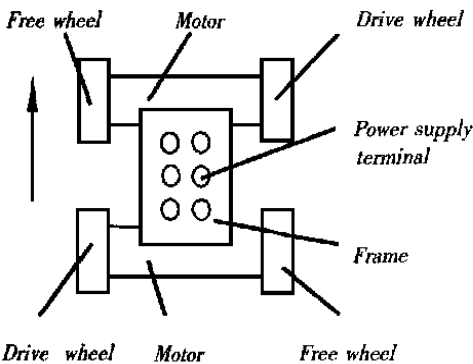


Fig. 5 Construction of wheeled microrobot made by Toshiba

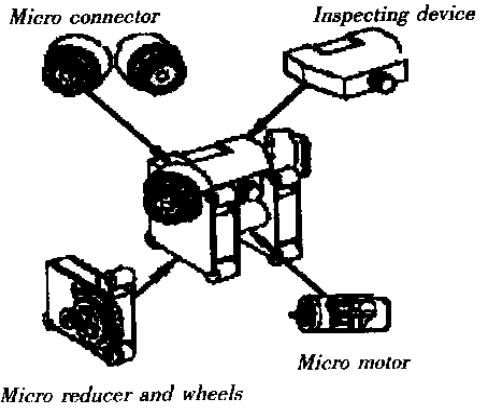


Fig. 6 Wheeled microrobot made by Mitsubishi

日本三菱公司研制出用于核电站蒸汽发生器的热交换管道外表面检测的轮式微机器人<sup>[11]</sup>。图 6 为结构示意图，样机的尺寸在  $5 \times 9 \times 6.5\text{mm}^3$  以内，重 0.42g，移动速度为 2mm/s。它由特制的超微马达驱动，机器人两端各有一个轮式减速行走机构，每个轮式减速行走机构有两个轮子与移动表面接触，一个轮子由微马达通过微减速器驱动，另一个是随动轮。通过两端主动驱动轮的差速可以实现微机器人的转向。其间的关键是微马达和微减速器的设计制造，微马达直径为 1.6mm，长 2mm，转速为 4000r/min，微小减速器尺寸在  $5 \times 5 \times 1.5\text{mm}^3$  以内，采用 3k 型行星齿轮系统，减速比为 201，微齿轮模数为 0.03mm。多个微机器人可以通过连接器连接成一圈，套在热交换管道外表面上移动。

东京工业大学研制出了基于螺旋运动原理管内移动轮式微机器人<sup>[12]</sup>。图 7 所示为螺旋运动的原理图。该微机器人的本体由几个单元体通过弹簧连接而成。每个单元体上均布有三只支撑臂，用螺旋弹簧将支撑臂上的小轮紧压在管道内壁上，产生预压力。小轮的轴线相对单元体的轴线倾斜了一个角度，通过软轴将扭矩作用于单元体上，驱动小轮沿着管道内壁的螺旋线轨迹滚动，使微机器人沿管道轴线移动。该微机器人可在内径  $\Phi 27\text{mm}$ ，曲率半径不小于 200mm 的管道内移动，速度约 34mm/s。

上海交通大学开发出一个蛇形的轮式微机器人<sup>[13]</sup>。该机器人是模仿蛇移动时身体左右扭动的波动特性，以平面行波作为机器人运动的基本模式。它是由一系列连杆连接而成的自由多刚体系统，为获得良好的位置和姿态，每个关节用微特步进电机直接控制。每个步进电机用来控制相邻刚性连杆之间的夹角，连杆在电机的驱动下作平

面运动。连杆两边装有滚动轴承作为车轮,此时滚动轴承只是用来改变纵向和横向的摩擦系数之比,而不是用作驱动轮。该微小机器人的直线长度为 550mm,截面尺寸 45mm×35mm,改变脉冲驱动信号的频率可改变其移动速度,最快速度为 250mm/s。

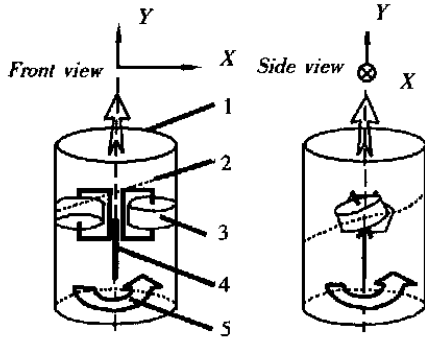


Fig. 7 Principle of wheeled microrobot based on screw motion moving in micro pipe

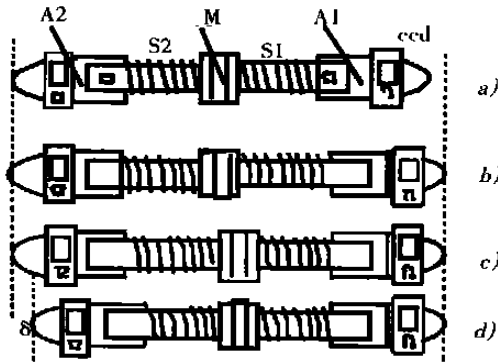


Fig. 8 Principle of worming microrobot actuated by electromagnet

### 2.3 蠕动式微小机器人

蠕动式微小机器人模仿爬行类动物的移动方式,身体一般由两或三部分组成,其头部和尾部(或第三部分)分别起着保持器的作用,使之在不同的阶段与相对移动表面保持不同的关系(接触吸附或脱离),从而驱动身体运动。

广东工业大学研究出一种电磁力驱动的蠕动式微小机器人<sup>[14]</sup>。图 8 为其移动原理。在初始状态时(图 8a),两个线圈 C1、C2 分别通电,机器人的驱动器 A1、A2 相互吸合;当 C1 掉电时(图 8b),弹簧 S1 将机器人前部 A1 向前推动一个步距;然后,C2 掉电,C1 通电(图 8c),平衡质量块 M 被 C1 吸附前移,弹簧 S2 被拉伸;C1 掉电,C2 通电(图 8d),机器人后部 A2 前移一个步距,最后 C1、C2 同时通电,回到初始状态,从而微小机器人向前移动了一个步距。磁性爪 T1、T2 用来保证

有效位移量的形成。只须简单地改变通电顺序即可使机器人向后蠕动。

西安交通大学研制出压电陶瓷驱动的蠕动式微小机器人<sup>[15]</sup>,它主要由压电陶瓷连接两个相同的、分别承担头部和尾部动作的电磁铁组成。头尾的电磁铁分别通电。在压电驱动器通电伸长的时间段内,若尾部电磁铁通电吸附而头部电磁铁断电松开,则头部向前移动了一个步距;在驱动器断电缩短的时间段内,头部电磁铁通电吸附而尾部电磁铁断电松开,则尾部也向前移动了一个步距,从而整个机器人前进了一个步距。改变头尾电磁铁的通电时序,即可反向移动。

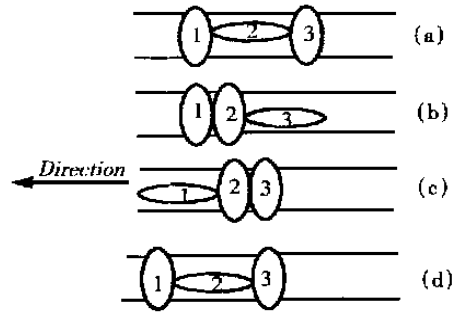


Fig. 9 Motion principle of micro peristaltic robot

上海交通大学开发出用 SMA(形状记忆合金)驱动的可在软管内移动的蠕动式微小机器人<sup>[16]</sup>,图 9 为其移动示意图。该微小机器人由三个柔性单元体组成,每个柔性单元体的两端为绝缘板,两板之间连有三根 SMA 元件,每根 SMA 与中心点的连线间互成 120 夹角。两块板及三根 SMA 用橡胶囊加以封闭,囊中充入空气。根据 SMA 的形状记忆原理,当 SMA 升温到记忆状态时,SMA 收缩,此时柔性单元变得短而粗;当 SMA 冷却后,该柔性单元恢复到细长状态。图 9(a)中,机器人靠处于短粗状态的 1、3 柔性单元支撑在软管中,单元 2 处于细长状态;图 9(b)中,单元 3 恢复到细长状态,之后单元 2 收缩成短粗状态,单元 1 与管壁摩擦力足够大而停止不动,因此机器人中心向左移动了一定距离;同理,图 9(c)中,单元 2、3 处于短粗支撑状态,单元 1 细长,中心继续左移;图 9(d)中,单元 2 变细长,单元 1 变短粗,从而机器人左移了一个步距,回到初始状态。分别控制同一柔性单元中不同 SMA 元件的伸缩状态,可使单元在空间三维方向实现偏转和弯曲,实现在弯管中的移动。样机长 90mm,在直径 20mm 的橡皮管道中最高移动速度为 15mm/

min。

美国卡内基—梅隆大学研制出一种主动内窥检查蠕动式微机器人<sup>[17]</sup>, 它由导向机构、骨架和橡胶管组成, 骨架能够在刚性和柔性之间转换, 橡胶管有一定硬度且能沿着骨架移动。西北工业大学研制出了在电致伸缩陶瓷致动条件下、借助电流变技术实现蠕动的微机器人<sup>[18]</sup>。

## 2.4 游动式微机器人

日本香川大学从仿生的观点模仿鱼的游泳原理, 应用 ICPF (Ionic Conducting Polymer Film) 高分子材料作驱动器, 研制出了一种水中微机器人<sup>[19]</sup>。如图 10 所示, 该样机形似小船, 本体用木头制作, 长 40mm, 宽 10mm, 厚 2mm。尾部有一对驱动翼片 (象鱼类的鳍), 分别由 ICPF 在脉冲电压作用下分别驱动而产生推进力, 改变两个脉冲电压的频率 (0.1Hz ~ 5Hz) 和相位差可控制其在水中的游动速度和方向, 最快速度为 5.35mm/s。

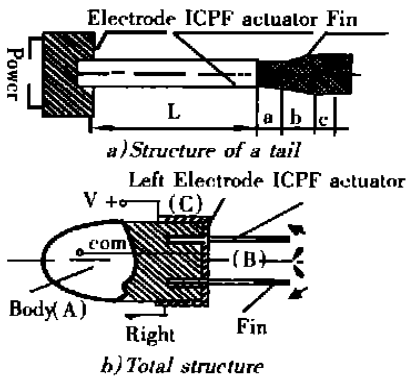


Fig. 10 Structure of micro swimming robot

日本名古屋大学开发了用压电陶瓷驱动的水中移动微机器人<sup>[20]</sup>。该机器人长 32mm, 宽 19mm, 本体的两侧外伸出呈某一夹角两条腿, 腿

参考文献:

- [1] 李路明, 王立鼎. MEM 研究的新进展——微型系统及其发展应用的研究[J]. 光学 精密工程, 1997, 5(1): 67- 73.
- [2] 蔡鹤皋, 孙立宁, 安辉等. 微型机械和机器人的发展状况[J]. 仪器仪表学报, 1995, 16(2): 38- 41.
- [3] 张东明, 竺长安, 杨杰. 电磁驱动式微型机器人的移动机理和设计[J]. 机器人, 1995, 17(4): 223- 229.
- [4] 孙麟治, 孙萍, 秦新捷等. 细小管内爬行的微机器人[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(5): 57- 63.
- [5] Masato M, Kunio K, Fumikazu O. 1cm<sup>3</sup> miniaturized mobile machine driven by electromagnetic force[A]. 1st IFTMM International Micromechanism Symposium[C]. Piscataway: IEEE, 1993. 41- 45.
- [6] Takaharu I, Hitoshi K, Nobuaki K, et al. Characteristics of piezoelectric locomotive mechanism for an in-pipe micro inspection machine[A]. Proc. of 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science[C]. Piscataway: IEEE, 1995. 193- 198.
- [7] Toshiyuki M, Motomu A, Hiroshi F, et al. Mechanical analysis for mobile machine with piezoelectric element [A]. Proc. of the 1992 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems[C]. Piscataway: IEEE, 1993. 1685- 1690.
- [8] Toshiyuki M, Hiroshi F, Motomu A, et al. Improvement of micro mobile machine with piezoelectric driving force

的末端装有驱动翼片。将一定幅值和频率的交变电压作用于 PZT 驱动器, 使其产生交变位移, 通过放大机构将微小位移放大传递给驱动翼片, 并使其发生共振, 从而驱动微机器人在水中游动, 其最快移动速度可达 32.5mm/s。

## 3 结 论

腿足式微小机器人的移动不连续、振动较大, 但结构较简单, 有的驱动源与移动载体合二为一, 微型化潜力较大。

轮式微小机器人的运动具有连续性、平稳性, 结构较复杂, 同时其研制受到了微电机和传动机构的限制, 目前商品化的电机尺寸较大, 微小精密零件加工困难。

蠕动是一类有利于微机器人实现的移动方式, 具体实现方法较多, 其运动具有周期性, 控制较容易, 但移动速度较慢。

游动式微机器人通过翼面的摆动在液体中获得驱动力前进, 它在生物医学工程领域有良好的应用前景。

根据微小机器人的本身特点和工作环境要求, 其移动机理和结构与常规机器人有较大不同。研制微机器人系统, 首先要解决的是驱动器问题。微小机器人的驱动器要满足功重比高、尺寸小的要求, 常用的驱动器有微电磁铁、压电晶体、形状记忆合金、微特电机等。此外, 应尽量采用直接驱动, 减少传动链。要成功研制微机器人, 不仅要开发出新型的驱动器, 而且在移动方式上也要有创新, 以降低对驱动器的要求。

actuator[A]. Proc. of 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science[C]. Piscataway: IEEE, 1995. 211- 217.

- [9] 李明东, 马培荪, 马建旭, 等. 形状记忆合金驱动器驱动方式研究[J]. 机械设计与研究, 1999, 3: 27- 29.
- [10] Yukihiisa H, Ken I, Hirokazu I, et al. Development of micro mobile machine with wheels[A]. Proc. of 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science[C]. Piscataway: IEEE, 1995. 219- 224.
- [11] Shimizu N, Asai K, Aoki S, et al. Mechanical planetary gears for a micro-reducer[A]. The Fourth International Micromachine Symposium[C]. Piscataway: IEEE, 1998. 177- 181.
- [12] Iwao H, Nobuyuki I, Kohichi M. An in-pipe operation microrobot driven based on the principle of screw [A]. IEEE 1997 International Symposium on Micromachine and Human Science[C]. Piscataway: IEEE, 1997. 125- 129.
- [13] 崔显世, 颜国正, 陈寅, 等. 一个微小仿蛇机器人样机的研究[J]. 机器人, 1999, 21(2): 156- 160.
- [14] 程良伦, 杨宜民. 一种新型管道内微机器人的研究[J]. 机器人, 1999, 21(4): 249- 255.
- [15] 蒋庄德, 姜义勇, 张毓荣. 微动行走机构研究[J]. 仪器仪表学报, 1996, 17(1): 284- 286.
- [16] 马建旭, 李明东, 包志军, 等. 仿蚯蚓蠕动微机器人及控制系统[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(7): 855- 861.
- [17] Robert H, Sturges J, Schitt L. A flexible tendon-controlled device for endoscopy[J]. The International Journal of Robotics Research, 1993, 12(2): 121- 131.
- [18] 苑伟政, 胡晓江, 马炳和. 蠕动微机器人的电流变结构智能化与运动模型研究[J]. 机器人, 1997, 19(4): 287- 289.
- [19] Guo S, FUKUDA T, KATO N, et al. Development of underwater microrobot using ICPF actuator[A]. Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation[C]. Piscataway: IEEE, 1998. 1829- 1834.
- [20] 福田敏男, 川本敦史, 新井史人, 等. 流体内マイクロ 移动ロボットに関する研究[J]. 日本機械学会論文集, 1995, 61(11): 274- 279.

## Locomotion methods of mobile microrobots

LI Min, ZHANG Ya-nan, GONG Zhen-bang

(*Department of Precision Mechanical Engineering,  
Shanghai University, Shanghai 201800, China*)

**Abstract:** Microrobotics is an important branch of MEMS. Many microrobots have been invented and they will be widely used in the future. The ways of designing and manufacturing microrobots are different from those of ordinary robots. Because of their narrow working environments and special usage, it is almost impossible to apply conventional actuators, transmission mechanisms and executive mechanisms to microrobots. According to their locomotion methods, microrobots can be classified into four types (legged type, wheeled type, worming type and swimming type). Some prototypes based on each locomotion method are discussed and their novel mechanisms are analyzed. The miniaturization of actuators is the key to the design of microrobots. The conclusion is reached that innovative and efficient locomotion methods can lower the demand on micro actuators.

**Key words:** MEMS; microrobot; locomotion; actuation

作者简介: 李 (1974- ), 男, 江西南昌人, 上海大学机电工程与自动化学院精密机械工程系博士研究生, 研究方向为微小机器人、机电一体化。