

文章编号 1004-924X(2003)04-0333-05

# 微型机器人外场驱动技术的研究现状与发展

付国强,梅涛,孔德义,张彦

(中国科学院合肥智能机械研究所 传感技术国家重点实验室,安徽合肥 230031)

**摘要:**介绍了微型机器人外场驱动技术的特点及应用场合,综述了国内外在这方面的研究进展,并对利用外场实现微型机器人无线驱动的相关技术作了分析和展望。微型机器人在光波、磁场、超声波、微波等外部能量场的作用下能无物理接触地获得能量,就可以实现无线驱动,从而有效地克服了用引线和电池供应能量所带来的不足。

**关键词:**微型机器人;无线供能;外场驱动;进展

**中图分类号:**TP242 **文献标识码:**A

## Status quo and future development of microrobot field driving technology

FU Guo-qiang, MEI Tao, KONG De-yi, ZHANG Yan

(The State Key Lab of Transducer Technology, Hefei Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Firstly, the characteristic and application of the external field driving technology used in microrobots are introduced; then the research advance is presented; finally some correlative technology problems and perspective in future are analyzed. Microrobots could absorb energy in no physical connection methods from some types of external energy field such as light, microwave, magnetic field and ultrasonic field, etc, so they are driven wirelessly, and the disadvantages of the power supply method of microrobots using cables or micro battery could be overcome.

**Key words:** microrobot; wireless power supply; external energy field driving technology; development

## 1 引言

自上世纪 90 年代以来,随着微电子机械系统(MEMS)的蓬勃发展,微型机器人已成为它的一个重要分支,各种机器人的研究成果不断涌现。目前国际上对微机器人还没有统一的定义,根据微机器人移动形式和所处环境大致可以分为三大类:行走型微机器人;管道微机器人;人体体内医

疗微机器人<sup>[1]</sup>。微机器人一般集成了微传感器、微执行器、微控制器、微操作器和微能源等几个单元,但它不能简单地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、生物科学、通讯和自动控制等许多领域<sup>[2]</sup>,需要解决的问题有能源供给问题、通讯问题、自主控制问题等。

收稿日期:2003-03-16;修订日期:2003-04-19.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60075022)、国家 863 计划资助项目“无线肠胃检查机器人关键技术研究”(2002AA420100)、安徽省优秀青年基金资助项目(2002 - 2003 年度)

## 2 外场驱动技术的特点及应用

通常情况下对微型机器人运动所需能量的供应方式有:通过引线供电或导管供气(液)压;自带电池;吸收外部的能量;前一种为有线方式,后两种为无线方式。有线方式的优点是能量供应既方便又充足,所以目前被广泛采用;但对于应用在细小管道和狭小空间等特殊环境下的微型机器人,如果采用有线方式供能,会使得微型机器人的运动灵活性、移动距离和行走路线受到限制。由于目前还没有开发出高容量的微型电池,所以用电池供能,一方面会使机器人的尺寸增大,另一方面也无法满足长时间作业的需要。如果微型机器人能对某一个外场敏感或者从外场吸收能量,那么它就可以获得充足的能源,从而克服了有线和电池这两种供能方式的不足。

外场驱动技术在微型机器人上的应用主要有下面几个方面:

- (1) 细长工业管道中作业的微机器人。如工业上热交换器及核电站微小管道空间的检测等。
- (2) 生物体体内作业微机器人。如人体肠道或血管检查微机器人;分散于体内与有害细菌作战的微机器人等。
- (3) 超净狭小环境下作业的微机器人。

## 3 国内外研究现状

常见的外部能量场有微波、超声波、磁场和光波等,近年来国内外对利用这些外场实现微型机器人的无线驱动均有研究,并取得了一些进展。

### 3.1 外场直接驱动微执行器

某些材料可以对外场直接产生响应,如铁磁性材料和巨磁致伸缩材料(GMA)对磁场的响应、形状记忆合金(SMA)对热的响应等,所以用这些材料制作的微执行器可以直接在外场的激励下动作,从而实现无线驱动。

#### 3.1.1 超声场驱动

日本东京大学 Takashi Yasuda 等人用超声场驱动微型蚂蚁<sup>[3]</sup>,实现了前进和转向运动。微型蚂蚁的尺寸为 1.5 mm × 0.7 mm,材料为单晶硅,使用 IC 技术制造。微型蚂蚁置于压电振动台上,压电振动台振动时产生超声能量场,其振动频率

可以被控制,如图 1 所示。由于微型蚂蚁各个腿的固有频率各不相同,所以发生共振的腿将被激活。这样使用不同的振动频率组合就可以使微型蚂蚁完成不同的动作。

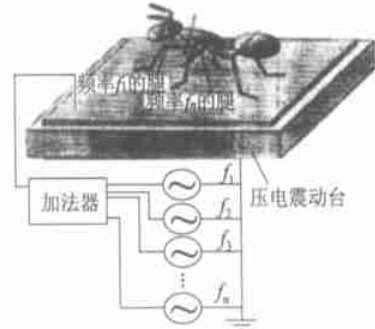


图 1 超声场中的微型蚂蚁

Fig. 1 Micro ant in ultrasonic field

#### 3.1.2 外磁场驱动

日本 Nagoya 大学 Fukuda 等人用巨磁致伸缩材料(GMA)制作了 40 mm × 10 mm × 2 mm 的微型管道机器人<sup>[4]</sup>,在交变磁场的激励下能够实现前进和后退。巨磁致伸缩材料是一种在交变磁场中长度会发生伸长和缩短的智能材料,在巨磁致伸缩棒的侧面安装上具有一定倾角的腿,当施加外部交变磁场时,巨磁致伸缩棒的变形被放大,并依靠腿尖与管道内壁的碰撞实现移动,移动方式如图 2 所示。实验表明移动方向与腿的倾角方向相反,并可以通过控制加外部电磁线圈上的电流来改变;移动速率与外磁场激励频率有关,在一定频率范围内随着频率的增加而增大。

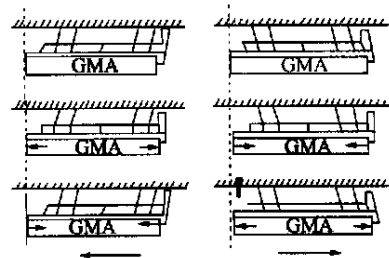


图 2 GMA 管道微机器人的移动模式

Fig. 2 Moving mode of in-pipe GMA microrobot

日本东北大学的 K. Ishiyama 等采用外加旋转磁场驱动螺旋状结构的磁体<sup>[5]</sup>,微机器人的本体是一个直径为 1.2 mm 的圆柱形 NdFeB 永磁体,在本体上缠绕有直径为 0.15 mm 的金属线,

形成一个螺旋状叶片,如图 3 所示。当外加旋转磁场时,磁体在径向被磁化,产生与外磁场同步的旋转运动,叶片给液体一个向后的作用力,反过来机器人受到一个向前的推进力,因此向前游动。通过改变外磁场的方向来控制运动方向,运动速度决定于外磁场的强度、频率和介质。

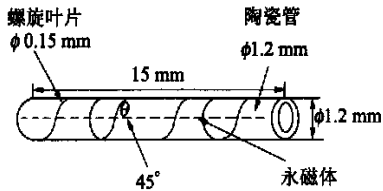


图 3 外部旋转磁场推进的泳动微机器人

Fig. 3 Swimming microrobot driven by external rotating magnetic field

中国科学院智能所的梅涛等研制了采用交变外磁场驱动的微型游泳机器人<sup>[6-7]</sup>,机器人长 15 mm,宽 10 mm,厚 3 mm。微执行器由铁磁橡胶(FMP)材料制作,它的尺寸为 8 mm 长,2 mm 宽,0.5 mm 厚,将两个相同的微执行器以约 40 的角度粘贴在蜡本体两侧。实验装置示意图如图 4 所示,给螺线管施加交变电流,螺线管产生交变均匀强度磁场,处于该磁场中的微执行器受磁化作用而摆动,就像鱼的鳍一样划水推动机器人运动,改变外加交变磁场的强度和频率可以控制运动方向和速度大小。在实验中,微型机器人向前游动时的交变磁场强度及频率为 15 mT、20 Hz;使其反方向游动的交变磁场强度和频率为 10 mT、10 Hz;实验还表明使微型机器人能够有效游动的交变磁场频率范围为 10~26 Hz。

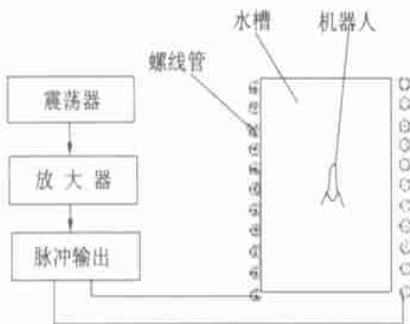


图 4 铁磁橡胶微型游泳机器人实验装置示意图  
Fig. 4 Experiment system of FMP swimming micro-robot

日本 Mie 大学的 Mir Behrad Khamesee 等研制了一种磁悬浮微型机器人系统<sup>[8]</sup>,如图 5 所示。磁驱动单元产生微机器人操作所需要的磁场能量,它包括八块电磁铁、两块永磁铁、一个用软磁材料制成的反向套和一个特殊电极片。运用自适应控制法则,不断调整磁场强度的大小,使机器人始终悬浮在 Z 轴方向。微机器人由磁性头部和本体组成,重量为 8.1 g,它可在 29 × 29 × 26 mm<sup>3</sup>的空间范围内操作 1.5 g 的物体,精度为 0.05 mm。

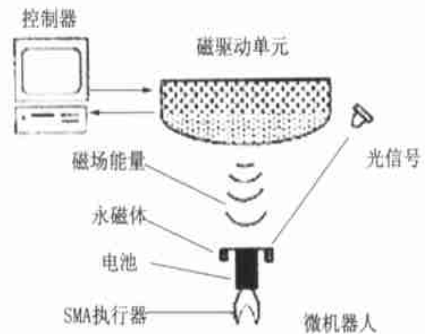


图 5 磁悬浮微型机器人系统

Fig. 5 Microbotic system using magnetic levitation

### 3.2 外场能量被转换成驱动电流

当微型机器人携带能量转换装置时,首先通过能量转换装置将外场能量转换成电流,然后用该电流去驱动微执行器。

#### 3.2.1 电磁感应驱动

日本 DENSO 公司研制出一种用微波驱动的金属管道探测微型机器人<sup>[9]</sup>,整个机器人的外径为 9.5 mm,长 60 mm,包括 RF 模块、控制电路、移动装置,CCD 摄像头,如图 6 所示。微波接收电路将 22 GHz 的微波转换成直流电,再通过门电路生成锯齿波电压用于驱动 8 层双压电变形膜执行器,微波能量功率为 480 mW。双压电变形膜在锯齿波电压的作用下,产生惯性冲击移动,即根据不同时刻静摩擦力大小与伸缩冲击力大小的比较,实现在金属管道中的移动,其前后运动方向通过改变锯齿波波形来控制。

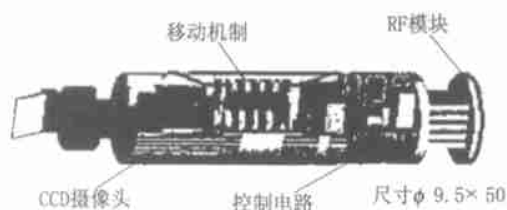


图 6 无线管道检查微机器人

Fig. 6 Wireless microrobot for pipe inspection

法国 Lille 大学的 P. Basset 等采用电磁感应电压驱动大步进静电微执行器无线微型机器人<sup>[10]</sup>。该系统的原理如图 7 所示。接收天线为环氧基座上的  $24\ \mu\text{m}$  镀金空心微线圈,当功率因子为 29,工作频率为 13.5 MHz 时,在 1 K 的电阻上获得了 100 V 的感应电压,然后用此感应电压形成的静电场驱动静电微执行器。

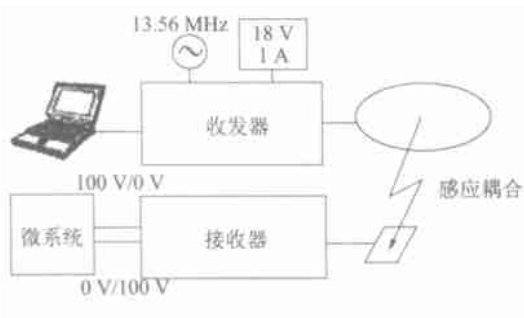


图 7 系统原理框图

Fig. 7 Overview of the system

### 3.2.2 光电转换驱动

加州大学伯克利分校 Richard Yeh 等研制了一种由太阳能供能的微型蚂蚁<sup>[11]</sup>。它集成了微

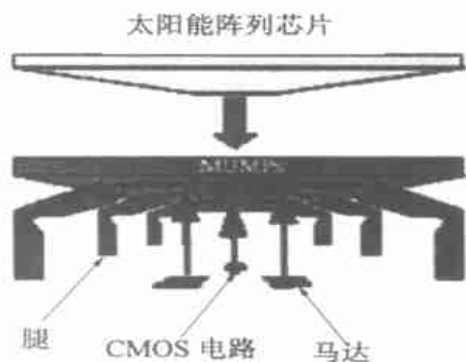


图 8 太阳能驱动的微型蚂蚁

Fig. 8 Micro ant powered by solar energy

传微传感器、微执行器、低功率微型 CMOS 控制电路、太阳能电池,如图 8 所示。用关节刚性连接的两自由度腿由静电微马达驱动,静电微马达由 CMOS 电路控制和太阳能电池提供能量。太阳能电池的功率密度约为  $10\ \text{mW}/\text{cm}^2$ ,可以满足静电马达驱动的需要。

日本 Nagoya 大学 Fukuda 等制作了用紫外光供能的悬浮移动微机器人<sup>[12]</sup>。它的下基座面积为  $80 \times 80\ \text{mm}^2$ ,上平板的大小为  $15 \times 15 \times 2\ \text{mm}^3$ ,运行操作过程如图 9 所示。首先上平板被空气压力浮起,然后紫外光照射在焦热电单元上使之产生电压,此电压在由下基座和上平板构成的两个电极板之间产生静电力,此静电力推动上平板在水平方向移动。

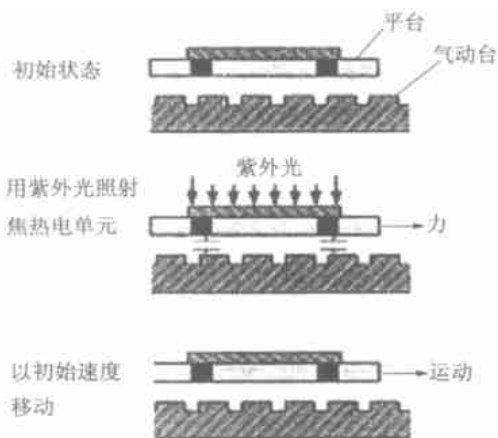


图 9 紫外光驱动的悬浮微机器人操作过程

Fig. 9 Operation sequence of levitated microrobot powered by UV light

## 4 相关技术问题分析

目前的外场驱动方法主要分为两大类:(1)外场的能量被直接转化为机械能;(2)外场的能量被转换成电能或热能等形式的能量后,再转化成机械能。

对于不同应用场合的微型机器人,要根据其具体的工作环境来选择驱动外场。如对于应用在工业管道或人体腔道中进行探测的微型机器人,由于管道是不可透光的,所以无法使用光波来驱动。同样是管道探测微机器人,当应用于人体的管道检查时,要求所使用的外场对人体没有伤害,所以一般不选择对人体有副作用的微波和超声波来驱动体内微机器人。

各种外场具有不同的驱动原理和特点。电磁波、磁场和超声波的能量转换原理各不相同。电磁波可以在空间传播,所以采用接收电路将发射电路产生的电磁波转换为电流。压电薄膜在超声波的作用下发生振动,由于逆压电效应,此机械振动被转换为电压。根据电磁感应定律,变化的磁场在闭环线圈中会产生感应电流。从国内外的研究现状来看,磁场是一种被应用得较多的外场,这是因为磁场具有产生容易、控制方便、输出力大和无方向性等特点;与磁场相比,光波、电磁波的方向性很强。

智能材料是一种集传感、控制和执行为一体

的材料。随着智能材料的发展,将会出现更多用对外场敏感的智能材料制作的微执行器,如用智能凝胶制作成的人工肌肉。

## 5 结论

能量供应的无缆化是微型机器人的一个发展方向。应用外场实现特殊环境下作业微机器人的无线驱动和控制,一方面避免了微机器人体积的增大;另一方面使微机器人的灵活性、安全性和可操作性增加,从而使研制出实用的无线微型机器人成为可能。

### 参考文献:

- [1] 上海大学精密工程系. 微机器人技术发展现状[J]. 机器人技术与应用, 1997, (6): 4-7.  
Department of precision engineering of shanghai university. Development of microrobot technology[J]. *Robot Technique and Application*, 1997, (6): 4-7.
- [2] 蔡鹤皋, 孙立宁. 微型机械和微型机器人的发展状况[J]. 仪器仪表学报, 1995, 16(1): 38-41.  
CAI H G, SUN L N. Development of micromachine and microrobots[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1995, 16(1): 38-41.
- [3] YASUDA T. Microrobot actuated by a vibration energy field[A]. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Solid-State Sensors and Actuators* [C]. 1993. 42-45.
- [4] FU KUDA T. Giant magnetostrictive alloy (GMA) applications to micro mobile robot as a micro actuator without power supply cables[A]. *Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop* [C]. 1991. 210-215.
- [5] ISHIYAMA K, SENDOH M, YAMAZAKI A, et al. Swimming micro-machine driven by magnetic torque[J]. *Sensors and Actuators Physical A*, 2001, 91: 141-145.
- [6] MEI T, CHEN Y, KONG D, et al. A microrobot driven by ferromagnetic polymer (FMP) actuators [A]. *1<sup>st</sup> Korea-China Joint Workshop on Robotics* [C]. Pohang, 2001. 19-21.
- [7] 梅涛, 陈永. 铁磁橡胶执行器与微型游泳机器人的尺度效应[J]. 光学精密工程, 2001, 9(6): 523-526.  
MEI T, CHENG Y. Scaling effect of FMP actuator and swimming microrobot[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(6): 523-526.
- [8] KHAMESEE M B, KATO N, NOMURA Y. Design and control of a microrobotic system using magnetic levitation[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2002, 7(1): 1-14.
- [9] NISHIKAWA H. In-pipe wireless micro locomotive system[A]. *1999 International Symposium on Micromechatronics and Human Science* [C]. Nagoya, 1999. 141-147.
- [10] BASSET P, KAISER A. A large stepwise motion electrostatic actuator for a wireless microrobot[A]. *Proc 15<sup>th</sup> IEEE Micro Electro Mechanical System* [C]. Las Vegas, 2002. 606-609.
- [11] YEH R, PISTER K S J. Design of low-power silicon microrobots[A]. *Proc. International Conference on Robotics and Automation Workshop on Mobile Micro-Robots* [C]. 2000. 21-28.
- [12] HATTORI S, FU KUDA T, NAGAMORI S. A Study on optical piezo-electric actuator (Response experiments by U. V. beam and photo response model) [J]. *J of Robotics & Mechatronics*, 1992, 4(4): 321-329.

作者简介:付国强(1977-),男,江西临川人,1999年毕业于西南交通大学机电工程专业,并获工学学士学位,现为中国科学院合肥智能机械研究所硕士研究生,主要从事微型机器人的研究。E-mail: fgqmail@sina.com