

微小机械的研究现状和动向

陈建宇 茅元新 孙麟治

(上海科学技术大学 精密机械系, 上海 201800)

摘要 介绍了微小机械的发展现状及国外在这方面的最新研究成果,对微小机械的研究方向提出了见解。

关键词: 微小机械; 微型机械; 主体; 集成化

1 引言

国际精密机械和机械人的研究向着微小化,智能化方向发展。一方面,随着大规模集成电路制作设备、工艺与技术的发展,以微米级尺寸为特征的微机械电子系统的研究已成为世界瞩目的重大科技发展方向,并且受到越来越广泛的重视。另一方面,以结构尺寸毫米级为特征的微小机械的研究也同样具有广阔的发展前景和实用价值。微机械的研究刚刚起步,理论基础还很薄弱。特别是微机械的制作,主要依赖于微细加工技术和光刻、蚀刻等技术。不仅制造技术难度大,而且设备投资大,在某种程度上限制了微机械的发展。微小机械的加工可以综合利用传统的机械加工工艺和现代微细加工工艺,其难度相对来说较低,投资量也少。微小机械与微型机械同是精密机械学科延伸发展的两个新的生长点,两者各有自身的工作环境。微小机械在其自身结构尺寸所定义的工作环境和界面中,具有其它尺寸限的机械所不可替代作用。在医疗、微电子精细加工设备、微组装技术以及航空航天等高科技领域,都有着非常迫切的研究开发需求。例如:人们目前生产中遇到的1mm的宝石轴承、齿轮以及SMT贴片电路中用的片状电路(1×1mm)等物体的搬运和装配,或者是依赖传统方式,采用较大的精密的机械,或者设计制造一些微小机械未满足要求。很显然,后者具有作用空间小、能耗低、成本低廉的特点,是最佳方案。另外,微小机械在系统尺寸上作为大中型机械向微机械的过渡,从它入手,其基础理论的研究成果以及实践经验,均可以作为微型机械理论研究和实际应用的引导和借鉴。通过不断努力减小尺寸,向微型机械过渡。此亦不失为加速微型机械实用化的重要手段。因此,微小机械同样是当今新技术研究的热点之一^[1]。

2 微小机械的研究现状

2.1 概述

根据原日本东京大学林辉教授的定义,把结构尺寸在1mm~100mm的称为微小机械

(Minimechanism)。尺寸在 $10\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ 的称为微型机械 (micromechanism), 在 $10\text{nm}\sim 10\mu\text{m}$ 尺寸段的称为超微型机械 (Submicromechanism), 统称为“微机械”^[2]。

目前, 微小机械的研究在日本开展的最为活跃, 取得不少成果。他们的研制开发工作已经深入到了很多公司, 国家和高等院校的研究机构。为了鼓励和促进微小机械的发展, 日本从 1991 年开始每年举行一次微小机械登山大赛, 其中涌现了很多优秀作品。其长度尺寸均小于 10mm 。比较有代表性的是 Osamus Miyagawa 研制的“Monsieur”光诱导行走机械人^[3]。Masato Mizukumi 等研制的电磁致动行走机械人^[4]。“登山”的难度逐年增大, 过去是攀登抛物面, 今年的比赛增加了攀登垂直壁面的内容。国内一些科研单位也在体积为 1mm^3 左右的微小电机, 微小加工设备等方面进行了研究并取得了进展。从总体上讲, 微小机械的研究开发过程分为以下几个阶段: 行走机构→加执行机构→加各种传感器→智能化的系统集成。在这几个阶段中, 不断微小化、集成化的宗旨贯穿始终。目前, 微小机械的研究主要是围绕实现微小可动物体而开展的, 并不苛求有明确的实用目的。

值得注意的是, 微小机械的内涵远非一般机械尺寸的缩小, 而应同时是高度集成化, 智能化, 能够独立完成做功的系统。其所涉及研究内容主要有以下几个方面:

- (1) 能量供给的方式和装置;
- (2) 能量转换的驱动器;
- (3) 小型传动元件和执行机构;
- (4) 控制系统和传感器;
- (5) 微型机械的加工和组装技术;
- (6) 系统集成技术。

2.2 能量的供给

表 1 微小机械的能量供给方式

| 分类 | 种类 | 特点 | 问题 | |
|----|----------|--|--|--------------|
| 有线 | 电线 | 高密度能量传输; 使用简单 | 能量传送线的刚性、 重量对运动产生限制 | |
| | 光纤 | 高密度能量传输; 不受外界干扰 | 能量传送线的刚性、 重量对运动产生限制 | |
| 无线 | 内部供给 | 发电 | 利用工作环境周围的能量 | 微小化的条件下效率低 |
| | 化学 电池 | 能量的贮藏容易; 移动方便 | 存在封装等问题 | |
| | 外部供给 | 电磁 诱导 | 借助于生物体的能量进行能量供给 | 微小化时的变换效率低 |
| | | 微波 | 空气中传输的能量损失小; 耐恶劣环境(油, 泥等)好 | 微小化时输送频率要求很高 |
| | 光 | 轻量化; 在水中和空气中均适用; 可同时供给多个主体; 可实现光下的半永久性工作 | 需要微小型, 高效的能量转换元件; 需要立体面上的安装; 需要电压化 | |

如表 1 所示,微小机械采用的能量供给方式可分为有线方式和无线方式两种。无线方式又分为内部供给方式和外部供给方式。目前的微小机械作品的能量供给绝大多数都是采用无线方式,由于有线方式的输送线的刚度和重量的影响,妨碍了主体的运动。而无线传送方式克服了以上缺点,并且可以实现同时给多个主体供能,协调完成做功,这对输出功率小的微小机械非常重要。但目前的无线传输方式还很不成熟。外部供给方式采用的微波、光以及电磁诱导等方法的传送和能量转换效率很低,辅助元件的制作不能作到微小化;内部供给方式多采用氧化银电池或镍镉充电电池,主要问题是输出功率低,另外还需进一步微小化^[5]。

表中所列的各种能量传送方式各有利弊,需根据环境条件来选择。也可以相互结合使用(例如既利用光又利用充电电池来供能),而且这可能是实用化的捷径。

2.3 实现能量转换的驱动器

选择合适的致动器是主体制作过程中的主要问题。它直接决定了主体的结构尺寸和性能。要求选择的动力源应在保证输出的前提下做到体积小、结构简单。

(1) 电磁型

当今的精密加工手段使得电磁型致动器进入实用化阶段,例如小型照像机及石英手表中的微小电机。上文提及的“mosieur”光诱导行走机械人中采用就是女式石英手表中的电机。这种电机是每步转 180°的单相步进电机。电机中用的稀土永磁转子的直径为 1mm,高仅 0.4mm。另外,日本已成功研制出直径为 0.8mm,长为 1.2mm 的微型直流电机。

(2) 超声波型

压电材料在受电场作用时,产生应变,应变的大小与电场的大小成比例。应变的方向与电场的方向有关,电场反向时应变也改变方向。在压电材料的两个面上设置电极并使两面间产生电位差,则材料就会与电信号对应而产生振动,于是产生超声波。利用材料的这种特性,日本研制了一种不用磁级的新型电动机——超生波电动机。这种电动机具有体积小、扭矩大、效率高、响应快等特点。在微小机械中具有广泛的应用前景^[6]。

(3) 形状记忆合金

形状记忆合金在微小机械中获获得应用。所谓形状记忆效应是指材料会记忆它在高温相状态下的形状。即它在低温相状态下不管如何变形,只要加热到一定温度就会立刻恢复到原来在高温状态下的形状。具有这种效应的合金叫形状记忆合金。应用这种变形能力,可以将形状记忆合金为动力源。在日本在登山大赛中,出现多种采形状记忆合金作致动的作品,其主要特点是结构简单变形量大^[7]。

功能材料的发展也不断为开发新型的能量转换装置提供出路。最过日本正在开发由高分子薄膜构成的叠层式静电致动元件和由经两面镀铂处理的全氟次磺酸膜(IFPC)作为致动的元件^[8]。

2.4 微小机械的传动和执行机构

现在的加工技术可使机械零件的微小化达到或接近毫米级。精密小齿轮和轴承等零件出现于很多作品中。例如上文所述的“Monsieur”中设计了三级齿轮传动,但是其整体尺寸仅为 12.4mm×11mm×10.8mm。采用类似于齿轮传动等传统方式设计的结构非常复杂,进一步小型化困难。在近几年的研制开发过程中十分重视系统集成,减少驱动器与执行机构的中间环节,使传动与执行机构集成一体,由此设计出一些新型传动形式和结构,下面介绍几种结构。

(1) 柔性铰链

它的特点是传动部分和执行部分集成为一体, 无机械摩擦, 无间隙, 运动灵敏度高。它可以将压电元件或电致伸缩元件产生的位移精确的放大, 在微小机械中也得到应用。但是由于压电元件的位移小, 为获得较大的输出变形, 柔性铰链的结构尺寸偏大。

(2) 斜毛足

这种斜毛足结构可以保证整体单方向运动。例如 Masato Mizukumi 等人研制的电磁致动行走机械。它所使用的斜毛足是由薄金属片经线切割加工制成。行进过程如图 1 所示。当电磁铁断电时, 永磁铁的吸引为大于弹簧力, 同时因前排足的摩擦力大于后排足的摩擦力, 后排足向前移动一段距离。当通电时, 由于电磁铁产生的磁斥力, 抵消了部分吸引力。弹力大于永磁铁的吸力, 同时前排足的摩擦力小于后排足的摩擦力, 前排足向前移动一段距离, 如此往复实现步进。斜毛足具有结构简单, 体积小的优点。

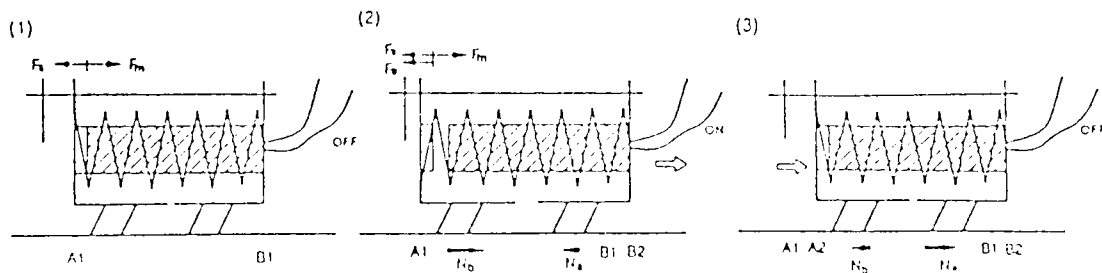


图 1 斜毛足行进过程

集成的思想在微小机械的设计中非常重要, 不仅要求传动与执行机械的集成, 而用要求致动、传动、执行乃至能量供给部分的集成。例如图 2 所示柔性执行元件, 它是由纤维强化橡胶管制成的微小机械, 橡胶管的截面内分成三个腔室, 将胶管的一端封闭, 另一端的三个腔分别连接供气管道。通过改变三个管道的压力差使胶管完成类似于手指的运动。将多根管组合并通过一定的控制, 就可以完成类似百足虫的爬行运动, 也可以模仿人手的动作。利用这种元件制作的爬行机构结构简单, 而且承载能力大。该元件的最小尺寸为 $\Phi 1\text{mm}$ 。但由于供气管道多, 且直径较大, 妨碍了机构的运动, 实际应用还有待于进一步的改进^[9]。

2.5 理论研究

有关微小机械的基础理论研究已经有了一些进展, 人们在研制和开发微小机械的过程中, 总结出下列特征:^[10]

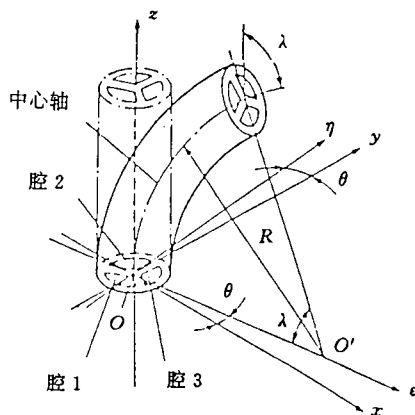


图 2 柔性执行元件

(1) 力的尺寸效应 $[L^n]$: 通过实验发现, 根据不同种类的力, 一定条件下, 存在静电力 $[L^0]$, 表面张力 $[L^1]$, 弹性力, 粘性力 $[L^2]$, 惯性力, 电磁力 $[L^3]$ 等不同 n 值的比例关系。

(2) 材料的尺寸效应: 据认为结晶晶界的剪切效应随尺寸的微小化而减少, 导致材料的强度成倍的增加。

(3) 表面现象: 实验证明, 由于尺寸的微小化, 表面积相对于体积来说变大, 使得化学反应和热现象的速度加快, 而且微量附着水分的影响和接触部分的摩擦阻力的影响都增大。

(4) 制作精度: 调查表明加工方法决定了加工尺寸的偏差; 尺寸越小精度越低, 各种动作所需的有效精度越难保证。

(5) 运动速度和原理: 经调查发现生物体和人造的运动物体的运动, 尺寸在 1mm 以上的靠惯性力, 1mm 以下的靠粘性力。在水中及其表面运动的机械的速度与尺寸 L 成比例; 在空中运动的机械的速度与 $L^{0.5}$ 成比例。

另外, 东京工大做了一些摩擦系数研究的试验, 测出了金属面之间的摩擦系数与物体尺寸很有关系, 当尺寸小于 10mm 后, 摩擦系数随尺寸的减少不断增加; 当尺寸为 1mm 左右时, 其摩擦系数约为正常情况下摩擦系数的 3~4 倍。

2.6 微小机械的加工技术

微小机械以毫米级尺寸为特征, 其加工方法与大中型机械的加工有共同之处, 但区别也很大, 微小机械的加工方法如下^[11]:

(1) 切削 车削加工对毫米级工件同样适用, 目前手表零件的加工很多是采用车削的方法。值得注意的是, 用来制造半导体的光刻技术也可以用在毫米级零件的加工上。

(2) 打孔 可以采用钻削的方法, 目前钻孔的直径最小可达到几百个 μm 。也可以利用放电加工、光刻、以及激光加工技术。

(3) 切割 利用线切割、光刻或激光加工工艺。

(4) 磨削 主要采用电解研磨的方法。

(5) 成形 采用电铸的方法。

(6) 表面处理 一般采用镀的方法。有时为了增加运动部分的润滑性, 选择润滑性良好的材料进行涂覆。

微小零件的贴合目前还很困难, 由于部件的尺寸小, 粘结的强度难以达到, 而且在部分粘结的情况下, 施加粘合剂的困难很大, 粘结剂的变形的影响也很大, 所以不用粘结剂的贴合技术的发展很重要。

微小零件的弯曲加工 (板材除外) 基本上不可行; 另外, 延展加工对毫米级零件来说是不需要的。

3 微小机械的研究方向和发展前景

微小机械的研究仍处于发展初期, 对主体的研究已取得了一些进展。就现阶段和将来可能的发展方向来看, 应着重从以下几个方面进行进一步的研究。

(1) 由于尺寸的微小化, 机构的机械性能, 运动特性, 各种物理特性等基础理论技术方面的问题急需解决。

(2) 能源供给问题的解决。目前, 研制的微小机械绝大部分是通过外拖线的方式供给能

量的。为了达到微小化,实用化的目的,需进行微小电池、信号和能源输送的研究,进而向化学能源、外部能源场的驱动方向发展。

(3) 吸收其它相关学科的研究成果开发新型材料,研制出能耗低、尺寸小、变形大、集成度高的结构。使执行元件及传动装置不段微小化。

(4) 研制软件体的、以及能够在管道内、水下、壁面、空中等不同环境下工作的结构形式。

(5) 冲破传统的设计思想束缚,注重研究方法的革新,综合各种物理的、化学的现象和自然规律。特别将仿生学综合到微小机械的研究中,不断引出新思想。

微小机械将不断向着小型集成化、实用化、智能化的方向发展。随着微机械加工制造工艺的发展,制作出灵敏度高、功能强的传感器,无疑会对微小机械的智能化起到促进作用。大规模集成电路的制作工艺越来越趋向于完善,它将使超高集成度的微型电脑安装在微小机械上,使其在复杂的情况和工作环境下独力完成工作,在工业生产、医药卫生、军事以及科学研究等领域发挥作用。

参 考 文 献

- [1] 孙麟治,李伟,微机械的研究现状和动向. 第三届精密机械年会论文集, 1993, 10, 1-10
- [2] 庄夔,精密机械小型化设计与微型机械. 第三届精密机械年会论文集, 1993, 10, 28-30
- [3] Miyazawa Osama, A self-contained micromechanism. IFToMM International Micromechanism Symposium, 1993, 7, 11-17
- [4] Mizukami Masao, et al., 1cm³ Miniaturized mobile machine driven by electromagnetic force. IFFTtoMM International Micromechanism Symposium, 1993, 7, 41-45
- [5] Kiyama Seiichi, energy Supply Technology for Millimachines. 精密工学会志, 1994, 60 (3): 339-344
- [6] Kasuga Masao, et al., Development of Running Microrobot Using Ultrasonic Micromotors. IFFTtoMM International Micromechanism Symposium, 1993, 7, 30-35
- [7] 张名大等译, 功能金属材料. 辽宁科学技术出版社, 1988
- [8] Takamori Toshi, Actuator Technology in Millimachine. 精密工学会志, 1994, 60 (3): 333-338
- [9] Suzumori Koichi, et al., Development of Flexible Microactuator and Its Application to Robotic Mechanisms. IEEE International conference on robotics and Automation, 1991, 2: 1621-1627
- [10] Hayashi Teru, Introduction to actual micromachine (millimachine). 精密工学会志, 1994, 60 (3): 331-332
- [11] Furuta Kazuyoshe, Process Technology for Millimachine. 精密工学会志, 1994, 60 (3): 358-362

Research Status and Tendency of Minimachine

Chen Jianyu, Mao Yuanxin and Sun Linzhi

(Department of Fine Mechanical Engineering,

Shanghai University of Science and Technology Engineering, Shanghai 201800)

Abstract

This paper introduces the status of minimachine; together with some new achievements from abroad being shown; and it also suggests the research direction of minimachine .

Key Words: Minimachine, Micromachine, mainbody, Integration