

文章编号 1004-924X(2001)01-0001-05

全柔性机构与MEMS

于靖军, 宗光华, 毕树生

(北京航空航天大学机器人研究所, 北京 100083)

摘要: 柔性机构是一种新型机构。首先描述了柔性机构和全柔性机构的概念及特点, 论述了它们与MEMS之间的关系。然后详细介绍了全柔性机构在MEMS领域内包括微装配、微操作等应用背景下的状况及前景。最后就对全柔性机构研究中的几个关键技术问题如机构的分析、设计及加工, 柔性铰链的选择与设计, 驱动器的选择及设计等进行了探讨。

关键词: 柔性机构; 全柔性机构; 柔性铰链; 微型机电系统

中图分类号: A TP23 **文献标识码:** A

1 引言

在机构学领域, 一些学者已着手一类新型机构的研究, 并在国际上逐渐成为研究的热点。就像当时的并联机构那样。这类机构被M idha 等^[1]赋予了一个专门的术语——“柔性机构”。柔性机构是指在设计中采用大变形柔性元素, 而非全部采用刚性元件的一类机构。这种柔性是我们所希望具有的, 并利用它来输出运动或力, 与通常意义上的柔性杆(flexible link)机构有所不同。

有一类典型的柔性机构称为“全柔性机构”, 它包括两种: 一种是“具有集中柔度的全柔性机构”(lumped compliance compliant mechanism 简称LCCM), 其特征是用柔性运动副代替了全部传统运动副。另一类是“具有分布柔度的全柔性机构”(distributed compliance compliant mechanism 简称DCCM), 其特征是整个机构中并无任何铰链的存在, 这种柔性相对均衡地分布在整个机构之中。

无论是上述两种全柔性机构中的哪一种, 都具有以下几个优点: (1)可单片设计以简化结构, 免于装配; (2)无间隙和摩擦, 可实现高精度运动; (3)免于润滑, 避免污染; (4)免于磨损, 提高寿命。

基于全柔性机构所具有的这些优点, 并考虑到MEMS产品本身具有的特性, 目前全柔性机构已扩展到MEMS(microelectromechanical sys-

tem)等应用领域。目前, MEMS领域的研究工作主要围绕以下专题展开这一前沿技术的攻关: (1)集成化微型仪器与传感器; (2)微加工与测试技术; (3)微操作系统。其中专题(1)属于真正物理尺度范畴下的MEMS, 即所谓微米/纳米技术。专题(2)(3)所涉及加工、测试、操作的对象当在微观尺度下, 不过系统本身并不囿于这样的概念。

本文将从机构学的角度来讨论MEMS产品的实现方法及途径。为此, 首先详细阐述了全柔性机构与MEMS之间的关系, 然后从不同的应用领域出发介绍全柔性机构在MEMS中的应用。同时也就目前对全柔性机构研究中的若干关键技术做一些初步的探讨。

2 柔性MEMS^[2]

在设计中, 人与自然之间的差异可体现在结构方式上。传统意义上, 工程上的装置都设计成刚而强的, 系统也通常由不同的部件(或部分)组合而成。而自然界中的设计却是强柔并济的, 系统浑然一体。许多生物体都是通过利用柔性将能量转化为精妙复杂的运动。例如, 许多昆虫依靠柔性来拍打翅膀, 蜈蚣依赖柔性完成掘洞和其他的功能, 跳蚤也是如此, 其腿部通过特定的柔性设计, 可将其肌肉内储存的能量很快地释放出来并产生跳跃动作。在自然界中, 近90%的生物体是无脊椎动

收稿日期: 2000-10-20; 修订日期: 2000-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50075010);

863高技术资助项目(863-512-98-04-26)

物,而且随着尺寸维数的下降,无脊椎动物的百分比不断增大。在微生物(尺寸与MEMS相符合)王国中,柔性更是占着不可压倒的支配作用。

自然的这种偏好决非偶然,因为尺度效应^[3]在改变着万物。由于尺度效应的存在,MEMS产品受到非线性表面力的影响要比传统意义上的产品要大。而后者主要受惯性力的影响。惯性力的大小与物体体积成正比,而摩擦力是表面力,其大小与表面积成正比。因此几何相似而尺寸较小的装置将增加非线性表面力的影响而减小惯性力的影响。而这种非线性造成的不利影响正可通过采用柔性机构的设计方法来避免。

一般情况下,MEMS产品都有很高的精度要求。就机构而言,间隙和摩擦是影响机构精度的两个主要因素。有传统铰链构成的机构都不可避免地存在着间隙或摩擦。对这类机构通常采用的办法是通过对轴承的偏载或者预载消除掉间隙,但结果却增大了摩擦。消除这一方法总是以牺牲另一方为代价。而不合适的机械结构对精度的限制有时也是无法克服的。如间隙和摩擦就很难通过传感器和控制器克服掉。由于全柔性机构缺少间隙和摩擦,因此很适合MEMS设计。

另外,装配成本在整个劳动力成本中占有着相当大的比重。因此,设计者总要尽力减少装配成本。由于全柔性机构中并无明显的铰链存在,可设计成免于装配的整体性机械装置,使加工和装配成本大大减少。

总之,在MEMS产品的设计中,采用全柔性机构的型式不仅可以保证精度,还可降低成本。可以说,从机械角度全柔性机构为MEMS产品的开发,提供了一条切实可行的有效途径。

3 全柔性机构在MEMS中的应用

近几年来,日本、美国、欧洲等各国都投入大量资金进行全柔性机构的研究与开发,在进行基础理论研究的同时,已相继研制出了一些各具特色的MEMS产品或实验样机以作为MEMS的主体。相对国外,国内研究起步要晚一些,兴趣的重点大都在全柔性机构的应用开发上。

全柔性机构的应用可体现在以下几个方面:

3.1 体现在MEMS产品设计中

采用全柔性机构设计MEMS产品的例子很多。如微传感器、微阀、微鼠标等。微双稳MEMS全柔性机构^[4]是其中较为典型的一种,可作为微

阀、微开关等。这类机构用于MEMS产品设计中可帮助其提高功效和定位精度等。

3.2 用于MEMS产品的微装配

目前成熟的MEMS器件基本上不需要装配,但对于功能更强大,结构更复杂,由不同材料组成的MEMS器件的开发多采用LIGA(Lithography, Galvanoforming, Aboforming)加工技术,它要求对各部件进行微装配。这时采用由全柔性机构设计的微操作手,可灵活地操作这些微小部件,完成MEMS器件的装配工件。下面举几个这方面的例子。美国Sandia国家实验室以AMT14自由度全柔性空间机器人机构为平台,研制了视觉伺服控制的微装配机器人原型,用于LIGA部件装配。德国Karlsruhe大学研制了压电驱动的可实现大范围运动的微装配全柔性机器人机构。

3.3 用于微操作技术领域

(1) 生物工程显微操作

生物工程领域以微操作为实验手段的技术主要有转基因技术、细胞核移植、染色体显微操作、人工受精等。由于受到生理条件等限制,靠人工进行微操作效率较低,因此开发以操作精细、自动化程度较高为特征的微操作机器人机构及系统来代替手工操作将有着广阔的应用天地。目前已有的比较有代表性的例子有:日本机械工程研究所开发出两指全柔性空间机器人机构,芬兰Tempere科技大学研制出新型3自由度液压传动全柔性空间机器人机构。北京航空航天大学机器人研究所先后已研制了两套用于生物工程的微操作机器人系统,前者采用自行研制的6自由度串并联全柔性机构;后者的右手机构采用三自由度并联全柔性机构(图1)。



Fig 1 A 3 DOF fully compliant manipulator for bioengineering

(2) 医学显微外科手术

全柔性机器人机构可用于显微外科手术中。如进行脑外科、眼科、及腹腔外科手术等。美国现已开发出用于疏通眼球视网膜静脉堵塞的6自由度微操作机械手样机。

(3) 光纤对接

全柔性机构在光学领域中也得到了广泛的应用。如用作光纤耦合器中的精微校准平台、用于单模光导纤维引线对位工作的可实现多自由度协调运动的精微定位平台等(如图 2 所示)。

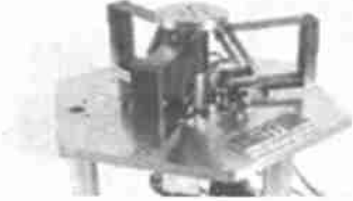


Fig 2 A 3 DOF fully compliant mechanism for fiber alignment

(4) 航空航天领域

空间实验站的主要研究目的之一是空间生物学的研究, 即利用空间的特殊环境, 开展基础生物学和基础医学的研究, 如细胞在太空环境中的增殖、植物细胞结构变化和组织繁殖等。由于太空环境的影响, 宇航员完成这种精细操作十分困难。如果采用遥控方式, 由全柔性微操作机器人完成太空细胞或基因的显微操作则更为现实。除此之外, 由于全柔性机构可免于润滑, 无需考虑太空中恶劣的环境对润滑剂骤冷骤热的影响, 因此更适合在其中工作。

4 关键技术

4.1 全柔性机构的设计及分析方法

由于柔性机构展现了既有机构的特点又有结构的功能, 因此可认为是二者的结合。这样就有了两种设计与分析柔性机构的方法。

(1) 基于传统刚性杆机构的方法

Howell 和 Midha 等提出了一种“伪刚体模型”(pseudo-rigid-body model) 法, 尤其适合于具有集中柔度的平面全柔性机构的分析与设计。该方法首先将弹性杆(或铰链)模型等效简化为相应的刚性杆模型, 即重构机构的“伪刚体模型”, 然后再沿用大家所熟悉的用于刚性体中对机构进行分析与综合的方法(拓扑结构法、图论、矢量分析法等), 加之能量法(如虚功原理等)的运用, 即可实现在保证了精度的同时也使问题的求解得以简化。用以分析和设计平面全柔性机构运动学问题的这种伪刚体模型法已得到了广泛的研究, 但该方法对于分析空间全柔性机构却存在着“先天不足”。由于多数空间全柔性机构中存在着球副, 使得伪刚体模型法受到了限制。对于 LCCM 而言,

现有的设计思路基本以已有的刚性体为模板, 铰链处被等效的柔性铰链替换; 其分析方法也沿用了刚性体的分析方法, 同时考虑到柔性元素的变形。但这种方法有时会产生较大的偏差。如自由度及工作空间等实际情况与理论值不符甚至差异较大等。为此作者提出了一种扩展的伪刚体模型法^[5], 可对具有等效柔性球铰的空间全柔性机构进行分析, 所得结果更接近实际情况。

(2) 基于传统结构优化的方法

对于 DCCM 而言, 密执根大学的研究小组引入“分布柔性”(distributed compliance) 的概念, 并总结了一套柔性机构标准结构的优化算法。如 Ananthasuresh^[6] 提出了一种基于连续体的柔性机构结构优化方法, Frecker 等^[7] 提出了基于多指标优化的柔性机构拓扑综合法等。这些方法均可归于有限元法一类。

此外, 也可利用 CAD 的方法指导柔性 MEMS 的设计。

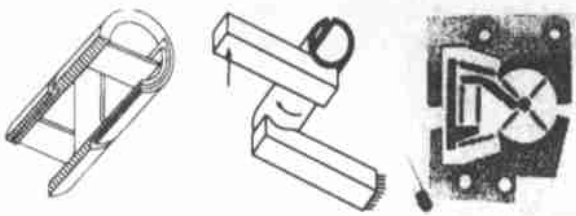
4.2 柔性铰链的选择与设计

对于 LCCM 而言, 柔性铰链的选择与设计是整个机构设计的关键。采用柔性铰链作为机构的运动副, 靠材料的弹性变形来实现微小的、等效的运动, 以使关节处产生的误差减少到极小。尽管采用柔性铰链的结构设计方法可以实现高精度的运动, 其有限范围的运动这一缺陷, 也必须加以考虑。在保证精度的前提下, 增大柔性铰链运动范围的方法主要体现在以下几点。

首先在柔性铰链材料的选择上, 尽管精确的计算公式尚需进一步研究, 但有一点可以肯定的是柔性铰链的运动范围与所用材料的许用应力与弹性模量之比成正比。因此, 为产生更大的变形, 柔性铰链的材料 σ/E 愈大愈好。较为理想的几种材料有铍青铜、钛合金、铝青铜、锡青铜、硅青铜(硬态)、黄铜、不锈钢等。并且随着新材料尤其是高性能材料的发展, 将使这类全柔性机构的研究领域得到扩展。值得注意的是: 一定要限制柔性铰链的运动范围, 以避免选择材料在残余应力区内。

在铰链的型式上, 传统的柔性铰链型式采用悬臂梁型式, 利用的是弯曲变形原理, 但缺点是变形比较小、运动范围十分有限。为克服这个缺点, 板簧式柔性铰链(见图 3(a)) 和裂筒式柔性铰链(见图 3(b)) 被提出, 这两种型式的铰链均采用的是扭转变形原理, 并都属近似线性大转角柔性铰链之列。还有, 瑞士 EPFL 实验室设计的柔性铰链(见图 3(c)) 仍采用传统的柔性铰链型式, 只是将

两个相同的柔性铰链串联起来,再附加一个约束机构将引入的附加自由度消除掉。这样在运动行程放大一倍的同时还保证了精度。此外,还有其他类型的铰链型式,各有各的优点的同时,也都存在着不足。相信,开发新型的柔性铰链也将是今后研究的一个热点。



(a) plate-spring joint (b) split-tube flexure hinge
(c) serial flexible pivot

Fig. 3 Three novel flexure hinges

4.3 机构本体的加工方法

前面已提到,目前成熟的MEMS器件基本上不需要装配,而采用单片集成电路的加工方法。但若开发功能更强大,结构更复杂,由不同材料组成的MEMS器件,这种加工方法就不合适了。在这方面LAG加工技术体现了它的优越性,能够加工金属材料,并能够加工出比硅更厚的尺寸。一些以微装配为应用背景的平面定位机构多采用这类加工方法。另外,以微操作为应用背景的全柔性机构基本以空间机构为主,且多为多环并联结构。为保证高精度,同样希望采用免于装配的加工方法。这时普遍采用的是电火花加工法(EDM)。电火花加工是利用工件和工具电极之间的脉冲性火花放电,产生瞬时高温使工件材料局部熔化和汽化,从而达到蚀除加工的目的。电火花加工由于其非机械接触加工的特点,很适合MEMS制造的要求。国内外对该加工技术进行探索和完善,已使得它在与MEMS制造相结合及实用化方面取得了较大进展。此外,EPFL提出了一种ECDM方法^[8],更加适合加工3D结构。

就机构本体的加工技术而言,现在发展的趋势是利用多功能复合加工的方法,如半导体加工技术、光刻技术、点火花与电解加工复合方法以及SPM技术^[9]等。随着MEMS和全柔性机构研究的不断拓展,对机构本体加工技术的开发亦将不断地取得进展。

4.4 驱动器的选择、设计及控制

在MEMS领域,一种较受欢迎的驱动器是压电陶瓷(PZT)。它具有结构紧凑、运动分辨率高(从理论上说可以达到无限)、响应快、输出力大、

无机械损耗、无磁场、无污染等优点,但输出位移范围小是它的致命弱点。虽然可以通过放大机构将位移放大,但必须以牺牲运动分辨率和输出力为代价。形状记忆合金(SMA)也是一种较为受欢迎的驱动器,它具有体积小、重量轻、精度高、动作柔性好、不易受周围环境影响等优点,缺点是响应速度慢。在所有的驱动器中,SMA在微观世界中具有最好的功率/体重比。此外还有尺蠖电机、直流电机、步进电机、音圈电机、超声波电机等也可作为MEMS的驱动器。但它们在MEMS中应用得较少。

通过在把PZT和SMA作为驱动器的系统内,采用驱动器与机构本体相分离的形式。但对于微观尺度的应用就不太合适了。因为装配变得很困难,系统中还有摩擦的存在。这里提出一种驱动器与执行器甚至传感器一体化集成设计的新概念。对整块的PZT或SMA材料进行激光切割,可免于装配,降低造价。甚至达到减振的功效。这对改善机构甚至系统的动态性能是大有裨益的。

对于驱动器的控制,这里以常用的压电陶瓷为例。由于压电驱动器存在着迟滞现象,而且在动态特性中还存在着蠕变的问题。为达到精确定位的目的,采用开环控制实现快速精确控制是不可行的,带有位置反馈的闭环控制是必需的。由于迟滞特性的存在,即使通过判断升降电压的趋势进行查表,以实现开环控制,也是不可行的。实际上,对于一个压电陶瓷,迟滞特性曲线并不是唯一的,因为在不同电压处发生折反,位移并不能发生突变,这就导致形成一条新的迟滞曲线,使数据表中需要存储的数据量相当庞大,查寻也非常困难。由于蠕变的存在,如果采用开环控制,在给定输入后,输出很长时间才会稳定下来,不但响应速变慢,而且难以控制精度。另外,温度特性和老化等问题也使得开环控制不可能精确。所有这些问题都可以通过闭环控制来弥补,以使系统输入输出线性化,实现快速精确的控制。现有的控制方法有PZT控制和变速积分的PI控制等。

除以上关键技术外,有关柔性机构的动态性能的研究也是一个难点问题。包括如何进行复杂全柔性机构的动态性能测试也是我们工作的一个重点。

5 结 束 语

MEMS研究领域很多,本文主要从机构学的

角度来论述全柔性机构与 MEMS 之间的关系, 并结合国内外的最新研究成果及我们自己的研究成果对全柔性机构在 MEMS 中的应用、部分关键技术问题进行了简单介绍。

从总体上看, 国内外对柔性机构的研究均处

于起步阶段, 这就为我们紧跟国际前沿, 赶超国际水平提供了契机。我国在机构学的理论上有自己的优势, 有一支很强的学术队伍, 完全可能在国际领域内占得一席之地。

参考文献:

- [1] Midha A, et al On the nomenclature, classification, and abstractions of compliant mechanisms[J]. *ASME J. of Mechanical Design*, 1994, 116(1): 270- 279.
- [2] Kota S, et al Tailoring unconventional actuators using compliant transmissions: design methods and applications [J]. *IEEE/ASME Trans on Mechatronics*, 1992, 4(4): 396- 408.
- [3] Trimmer W. Micro robots and micromechanical system [J]. *Sensors & Actuators*, 1989, 19(3): 267- 287.
- [4] Jensen B, et al Design of two-link, in-plane, bistable compliant micro mechanisms[J]. *ASME J. of Mechanical Design*, 1999, 2(3): 416- 423.
- [5] Yu J, et al Kinematics analysis of spatial fully compliant mechanisms by using the pseudo-rigid-body model[A]. *The 1st ICME 2000*[C]. Shanghai 2000.
- [6] Ananthasuresh G K A new design paradigm in microelectromechanical systems & investigations on compliant mechanisms[D]. Ph.D. dissertation, Ann Arbor: University of Michigan, 1994.
- [7] Frecker, et al Topological synthesis of compliant mechanisms using multi-criteria optimization[J]. *ASME J. of Mechanical Design*, 1997, 119(2): 238- 243.
- [8] Breguet J, et al Activities on microfactory in the institute of robotics systems at the EPFL [J/OL]. jean-marc.breguet@epfl.ch. 1999.
- [9] 李勇, 等 特种微型机械加工技术[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(3): 286- 291.

Fully compliant mechanisms and MEMS

YU Jing-jun, ZONG Guang-hua, BI Shu-sheng

(Robotics Research Institute, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Compliant mechanisms are devices that deliver a desired motion by undergoing elastic deformation. A typical compliant mechanism is called fully compliant mechanism. Owing to their several significant advantages relative to conventional mechanisms such as no backlash and friction, and no assembly, compliant mechanisms especially fully compliant mechanisms have been applied to many fields especially in MEMS. So research on compliant mechanisms and fully compliant mechanisms has been a hot issue in recent years. This paper firstly describes their concepts, characteristics and applications in MEMS. Finally several critical techniques and tendencies such as the analysis, design and fabrication of fully compliant mechanisms, selection and design of flexure hinge, selection, design and control of the actuator etc. are discussed.

Key words: compliant mechanism; fully compliant mechanisms; flexure hinge; MEMS

作者简介: 于靖军(1974-), 男, 河北省卢龙县人, 北京航空航天大学在读博士研究生。研究方向包括并联机器人运动学、柔性机构的设计与分析, 柔性 MEMS 及精密作业机器人机械的研究等。已在国内外学术刊物和会议上发表论文 6 篇。

宗光华(1943-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为机构学、机器人控制以及自动化工程。已承担国家“八六三”项目和国家自然科学基金项目十余项, 在国内外学术刊物和会议上发表论文三十余篇, 合作编译著作两部, 申请专利一项。