

文章编号: 1002-0446(2002)02-0184-04

微操作机器人的发展现状*

孙立宁 孙绍云 荣伟彬 蔡鹤皋

(哈尔滨工业大学机器人研究所 哈尔滨 150001)

摘要: 本文介绍了微操作机器人系统的组成、特点, 国内外的发展现状, 微操作机器人研究的主要内容及研究热点问题。

关键词: 微操作; 微操作机器人; 微操作器

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

CURRENT SITUATION OF MICROMANIPULATING ROBOT

SUN Lining SUN Shao-yun RONG Weibin CAI He-gao

(Robot Research Institute of Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: The construction and features, the current status home and abroad, and the research area and hotspot of the micromanipulating robot were introduced in this paper.

Keywords: micromanipulation, micromanipulating robot, micromanipulator

1 引言(Introduction)

随着纳米技术的迅猛发展, 研究对象不断向微细化发展, 对微小零件进行加工、调整和本地检查, 微机电系统(MEMS)的装配作业等工作都需要微操作机器人的参与。在自适应光学、光纤对接、医学、生物学, 特别是动植物基因工程、农产品改良育种等领域, 需要完成注入细胞融合、微细手术等精细操作, 都离不开高精度的微操作机器人系统。总之, 微操作机器人是人们探索微观世界不可缺少的重要工具。

2 微操作机器人的构成、特点、分类 (Constitute, characteristic and classification of micromanipulating robot)

微操作技术是指末端工具在一个较小的工作空间内(如厘米尺度)进行系统精度达到微米或亚微米的操作。微操作系统不同于 MEMS: 微操作系统进行的操作是微细的, 而装置本身并不是微型的, 这种系统一般是多种技术集成(如精密机械、计算机技术、控制技术、光学等)而成; 而 MEMS 是以微电子工艺(主要是硅加工工艺)制成的尺度微小的部件。目前还有一些用非微电子工艺加工制成的“小型机器人”(在毫米尺度), 可看作是 MEMS 的一个组成部分。

2.1 微操作系统一般由以下几个方面组成

(1) 高倍频、高分辨率的显微视觉系统; (2) 两个自由度以上的高精度、大范围运动的作业平台及辅助设备; (3) 能够改变操作对象位姿的多自由度操作机器人手; (4) 适于微小物体操作的微操作器, 如进行微型零件装配用的夹持器, 进行微细外科手术用的注射器、手术刀等。

2.2 微操作机器人特点

(1) 由于操作对象的几何尺寸小, 在操作过程中, 静电力、摩擦力、表面张力等其主要作用, 即微观操作的尺度效应。

(2) 操作对象质量小, 构造薄弱, 因而操作力不宜过大, 空气阻力相对其重量可能很大, 在进行操作时, 还需要释放操作。

(3) 由于操作对象小, 特别是在 0.5mm 以下时, 用肉眼很难看清其形状、位姿, 系统必须配有显微镜实现微细作业, 显微镜的视野大小决定系统的作业空间, 机构应保证操作对象始终在显微镜的视野中。

(4) 具有多自由度, 操作灵活, 便于调整, 运动精微, 根据操作对象的不同, 位移分辨率可达亚微米级或纳米级。

(5) 采用一定的方式(声、光、力)将操作的接触

力等传递给操作者. 操作者可通过主从遥控的方式对微操作过程及进行遥操作, 实现微操作过程中的力信息的放大, 和操作者宏操作位移的缩小.

2.3 微操作机器人的分类

2.3.1 按连接方式分

微操作机器人分并联机器人和串联机器人, 它们各具特色, 串联机器人具有正运动容易、逆静力学研究简单、惯性大等特点; 并联机构就是运动平台与机架之间由多条运动支链连接. 并联机器人具有工作空间小、逆运动容易、最大力的输出是所有驱动力的总和、刚度高、惯性小等特点. 并联机器人因其结构紧凑、设计加工简单、温度灵敏度不高、误差积累及放大、固有频率高, 避免了由震动引起的不可控重复误差等特点, 在微操作机器人中得到广泛的应用. 另外, 串并联机器人也已经出现.

2.3.2 按微操作的作业方法分

微操作机器人分移动型和加工型微操作机器人. 移动型包括微搬运和排列、微零件的装配; 加工型包括微观刻划及微观切割等.

2.3.3 按应用领域分

目前微操作机器人分面向医疗、生物工程的接触和非接触机器人微操作系统和面向微机械 (MEMS) 装配的机器人微操作系统.

3 国内外研究现状 (Research status)

国际上已有的主要研究包括: 日本东京工业大学的纳米机器人系统: 可在电子显微镜下完成超大规模集成电路的铝线切割实验; 美国国家标准局的柔性支承-压电驱动微调工作台 (分辨率 1 nm, 行程 50 μm , 用于航天技术中); 日本日立制作所的三自由度微动工作台, 用于投影光科技和电子曝光机, 粗动台行程为 250 mm \times 250 mm, 位移分辨率为 0.5 μm , 三维微动工作台被固定在粗动台上, 两个方向的移动行程为 20 μm , 位移分辨率为 10 μm , 角度行程为 1.4 m rad, 分辨率为 2 μrad ; 日本工程研究实验室、东京大学^[1]、长冈技术科学大学分别研制出高精度的六维精密工作台、六自由度微动机构等; 加拿大 McGill 大学研制的遥控纳米机器人, 用于生物操作 (直线电机、压电元件驱动力的平行铰链机构, 最高分辨率为 10 nm); 瑞典 Uppsala 大学的微操作机器人, 在电子显微镜下工作完成 200 μm 的硅片切割、熔接和单晶硅微型针的制作等. 美国 Sandia 实验室研制了用于 LIGA 零件装配的实验系统, 它由 4DOF AMTI 装配机器人、4DOF 精密工组台、微动镊子和长工作空间

的显微镜组成, 通过遥控操作, 可以完成采用 LIGA 技术加工的微型齿轮的抓取和释放操作, 齿轮外径 100 μm , 中心孔直径 50 μm ^[2]. 美国华盛顿大学生物机器人研究室研制了用于蛋白晶体操作和处理的微细作业系统^[3]. 日本东京大学 Mamoru 等人研制了用于微外科手术的机器人微操作系统^[4].

我国的微操作系统和微机器人研究也取得了重要的成果: 南开大学的“面向生物工程的微操作机器人系统”, 实现了对直径为 12~13 μm , 厚度小于 5 μm 的动物细胞的转基因注射; 北京航空航天大学“面向生物工程的微操作机器人系统”, 多次成功地进行小鼠卵细胞的纤维操作实验; 中国科技大学的“全光学生物微操作系统”, 利用光镊、光刀技术对细小生物细胞和活体进行捕获、移动、切割和细胞选择性融合等作业; 哈尔滨工业大学的“微米纳米级位移驱动器”达到 2 微米~5 纳米的线位移分辨率. “微操作机器人系统”粗动运动行程 25 mm, 运动分辨率 1 μm ; 旋转驱动运动行程 180°, 运动分辨率 0.01°, 微操作手 X-Y 向行程 38 μm , Z 向行程 9.5 μm , X-Y-Z 向分辨率为 10 nm. 长春光机所和大连理工大学的“MEMS 微操作系统”, 实现了显微立体成像下的细胞转基因操纵, 提高了操作效率与成功率.

4 微操作单元技术方面研究和开发的主要内容 (Research and development on micro-manipulating unit technology)

4.1 高精度定位和校准平台及其标准化、模块化

微操作机器人工作台一般采用二级定位, 用粗精相结合的两个工作台来实现, 粗工作台完成高速度大行程, 而高精度小行程由微动工作台来实现, 通过微动工作台对工作台运动中带来的误差进行精度补偿, 已达到预定的精度.

微操作机器人要具有较大的运动范围和很高的运动精度及运动重复性, 而且为了完成复杂操作还具有平动和转动多个运动自由度. 理论上讲, 机器人自由度越多, 其操作灵活性越好. 但过多的自由度也意味着控制难度的增加及成本的提高.

4.2 显微图像分析和引导技术

多数微操作机器人只有一套显微监视系统, 其操作控制方法是由操作者根据显微监视系统输出的图像, 通过操纵手柄、指套、键盘等来遥控微操作机器人的运动. 将显微视觉作为反馈控制源参与微操作机器人的伺服控制, 是最佳解决途径之一.

显微视觉技术即系统将通过显微镜得到的实施

图像进行处理,根据所得到的实时结果自动地对微操作工具的运动进行规划,以达到如同人眼参与的效果.图像数据的采集和处理延时一直是实现视觉伺服控制的主要障碍.为实现视觉实时闭环,提高控制品质与速度,研究视觉控制方案,开发具有系统自标定功能的显微视觉伺服系统是努力的目标.

在面向生物实验的微操作机器人系统中,一个必须解决的问题是微操作工具在垂直于焦平面的方向(Z方向)的定位^[5].利用显微镜视觉技术解决的第一个问题是对微操作工具进行纵深方向(Z轴)的标定;另一个问题是自动引导工具末端进入视野,以便进行操作,即当微操作工具在显微镜视野之外时,如何定位到视野中央.首先,由图像获取模块与自动调焦模块配合得到一系列操作工具末端图像,其次,利用傅立叶变换对这些图像进行处理而获得最清晰的那幅图像,从而确定焦平面的位置.

4.3 微操作工具的专用化和系列化

微操作机器人的末端操作器是微操作机器人的核心,所有功能的实现都要通过末端机构来完成,微操作的宏观位姿一般由工作平台来实现,而最终的操作精度还是要靠末端的精细操作来评价.下面简单介绍几种微操作机器人的末端操作器.

4.3.1 微钳

微钳是比较常见的操作器,一般完成微小零件的夹取和运送及装配.微小夹持机构主要有两部分组成即驱动部分和执行部分.常用的驱动方式有两种:一种是压电元件(PZT)驱动,它结构紧凑、无间隙、无摩擦、输出力大、响应快并可精确控制位移输出量;另一种是电磁力驱动,它具有原理简单、易实现、动作平稳、响应快等特点.之外还有静电驱动、步进电机驱动、电热式驱动、真空夹持等驱动方式.

目前,国内外报道的微小抓取机构的研究成果有中科院长春光学研究所研制的电容式微夹钳、美国哈佛大学研制的对两个碳纳米管加电压形成吸力的微钳、日本的压电式弹性微抓手、聚合胶手指、SMA驱动机械手、哈工大的压电式微操作机械手^[6]和上海交大的可控微型镊子等.

4.3.2 微注射器

微注射器是医学和生物工程经常要用到的工具.利用牵引机(puller)把细小玻璃管(直径约1mm)拉成极细的小管,再把此小管磨成外径8~10 μm ,内径5~7 μm 的注射小管(injection pipet)与外径60~80 μm ,内径10~15 μm 的固定小管(holding pipet)之后,把注射小管与固定小管装置在倒立立体显微镜

的显微注射器(micromanipulator)上,在200~400倍的视野下操作.毛细玻璃管用于捕捉与固定细胞,毛细玻璃针用于细胞的切割、注射等.机器人在控制器的命令下实时地对细胞进行追踪、捕捉、注射、转移等.

4.3.3 微量液体分配器

基因芯片的制造过程中要完成DNA微阵列(DNA microarray)的分配,就是将许多特定的寡核苷酸片段或基因片段有规律地排列固定于支持物(如膜、硅片、陶瓷片及玻片)上,每点的容积可以小到0.1~0.01nL,样点的直径约为100~150 μm .点样仪(arrayer或机械臂)是用来将大量的DNA样品点至玻片上,制备高密度的DNA矩阵.点样的方式分两种,其一为接触式点样,即点样针直接与固相支持物表面接触,将DNA样品留在固相支持物上;其二为非接触式点样,即喷点,它是以压电原理将DNA样品通过毛细管直接喷至固相支持物表面.接触式点样针有Split Pin(针尖开叉)、Capillary Pen、Spotlight Solid Pin、Pin and Ring(针和环系统)Solid Pin、Quill Pen等类型.

4.4 智能化人-机作业系统

为了实现自动操作,通常在宏观采用的主从遥控技术在微操作中更体现了其重要性,特别是VR技术的应用可以使微操作机器人具有更大的应用潜力.

仅有视觉信息还不足以反映操作的实际情况,因而加入微力传感器也有利于智能化控制、力遥控操作的实现.由于微操作中的操作力非常小,决定了微传感器具有高刚度、高灵敏度和小型化的特点.采用微加工方法制作的微传感器及传感器厚膜技术在微操作领域中必将大有用武之地.采用新型驱动器件和微传感器技术结合形成具有力感知功能的机构、驱动、检测一体化的微操作手和操作器是这一领域的重要研究方向.

5 微操作机器人研究的热点 (Research hotspot of micromanipulating robot)

5.1 驱动器

比较常见的驱动器是压电陶瓷,它具有结构紧凑、运动分辨率高、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不足,而且它还存在迟滞和蠕变,新型的控制方法是压电驱动器的研究热点.

尺蠖电机是利用压电效应根据仿生原理研制的

一种驱动器,它具有行程大、运动分辨率高、输出力大等特点。但外形体积大,作为微驱动的致动源有时受到空间的限制。

直流电机、步进电机、音圈电机、超声波电机等也可作为微操作机器人的驱动器,其控制方法成熟,运动分辨率高(可达50nm),外形体积较小。由于常采用传统的运动传递装置(轴承、导轨、丝杠等),回差大,因而重复精度不好。

形状记忆合金也是一种很好的微操作驱动器,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。

电磁驱动具有原理简单、易实现、动作平稳、响应频率快、动作范围大等优点。同时,它的结构相对复杂,装配精度要求高。

5.2 柔性铰链机构

柔性铰链具有以下优点:无间隙、无摩擦、无需润滑;运动平滑且连续;位移分辨率高、结构紧凑、无内热产生、可以承受温度突变、可在真空、失重状态下使用;位移或力可以预知、有保护功能(超载时,柔性铰链可能断裂,以保护其它设备)。柔性铰链也有不足之处:输入力(或位移)依赖于材料的弹性模量,而材料的精确弹性模量很难获得;存在洄滞,这是由材料的材质及性能造成的;只能应用于小位移场合;当施加力有所偏斜时,铰链容易失稳;承受载荷较小,如果加工质量不高,容易出现应力集中现象,造成铰链的断裂。

5.3 微操作机器人的位移传感器

微操作机器人的位移传感器种类很多,如电容式、电感式、电涡流式、应变式以及光栅、光电码盘、激光干涉仪、感应同步器、光纤微位移传感器等。

电容传感器技术具有测量精度高、重复性好,对温度、静压变化敏感度小等优点,分辨率可达0.1nm,带宽10kHz;电感式位移传感器具有精度高、线性范围宽、对使用环境要求不高等一系列特点,分辨率可达10nm,带宽10kHz;电阻应变式位移传感器具有体积小、精度高、线性和稳定度好、便于集成及加工工艺成熟等优点,分辨率可达1nm,带宽5kHz;光栅传感器灵敏度高、频带宽、抗电磁干扰、耐高压、耐腐蚀、体积小、重量轻、柔软可弯曲等优点,可以测量位移、角度、速度、加速度、爬行以及精密定位和自动对准等方面,测量步距达到1~0.001 μm ;光电编码器有旋转型和直线型,增量式和绝对式;激光干涉仪是集激光、精密机械、电子数据等现代化技术于一体的高精度多功能测试设备,具有测量范围大,分

辨率高,非接触测量等特点,分辨率达纳米级精度;光纤传感器灵敏度高、频带宽、抗电磁干扰、耐高压、耐腐蚀、体积小、重量轻,柔软可弯曲等优点。

5.4 微操作控制理论须做进一步探讨

微操作机器人系统是一个高度复杂的非线性系统,传递累积误差和超高精度微位姿实时监测的困难,造成建立精确模型设计控制方案和获得准确的手端误差信号进行反馈控制比较困难,所以系统的微运动精度也难以保持稳定(鲁棒性差)。尝试新的控制算法是一条可行之路。

5.5 微观世界物理规律的探讨

当操作对象的尺度间小到尺度效应明显作用的尺度时,温度、湿度、轻微振动等因素将直接影响操作的进行。微观物体间的作用力主要由范氏力(Van der Waals force)、静电力以及液层表面张力等等。操作培养液的细胞,不但要考虑重力作用,还要考虑浮力、流动力、布朗运动、范德华力、静电力等。

6 结论(Conclusion)

本文介绍了微操作机器人系统的基本组成,国内外的现状以及微操作机器人的研究与开发的主要内容,分析了研究的热点。从总体上对微操作机器人系统及其核心技术进行了介绍。

参考文献 (References)

- 1 Tomomasa Sato, Koichi Koyano, Masayuki Nakao, Yotaro Hattamura. Novel Manipulator for Micro Object Handling as Interface Between Micro and Human Worlds. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Yokohama, Japan, 1993:1674-1681
- 2 John T Feddem a, Ronald W Simon. CAD-Driven Microassembly and visual Servoing. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Leuven, Belgium, May 1998:1212-1219
- 3 Blake Hannaford, James Hewitt, et al. Telerobotic Macro for Remote Handling of Protein Crystals. International Conference on Robotics and Automation, 1997: 1010-1015
- 4 Mamoru MITSUISHI, Yasuhiro HZUKA, Hiroyoshi WATANABE, Hiroyuki HASHIZUME, Kazuo FUJIWARA. Remote operation of a micro-surgical system. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Leuven, Belgium, May. 1998: 1013-1019
- 5 卢桂章, 章建勋, 赵新. 面向生物工程实验的微操作机器人. 南开大学, 1999, 03: 42-46
- 6 张涛. 微操作机器人系统的研究及在微装配系统的应用. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1999, 7: 29-33

作者简介:

孙立宁(1964-),男,教授,博士生导师。研究领域:机器人技术,微驱动技术,微操作技术。

孙绍云(1973-),女,博士生。研究领域:微操作机器人。

荣伟彬(1973-),男,助教,博士生。研究领域:遥微操作机器人。