

文章编号: 1002-0446(2003)06-0554-06

微操作机器人的研究现状与发展趋势^{*}

江泽民, 徐德, 王麟昆, 谭民

(中国科学院自动化所复杂系统与智能科学重点实验室, 北京 100080)

摘要: 随着科学技术向微小、超精密领域的方向发展, 机器人所要操作的对象也从宏观领域扩展到亚微米、纳米级的微观领域。因此, 由微定位技术与机器人技术结合而产生的微操作机器人是机器人领域的新的研究方向, 具有广阔的应用前景。本文总结了国内外微操作机器人领域的发展现状, 介绍了微操作机器人的结构特点, 列举了其部分的应用实例, 在文章的最后展望了微操作机器人的发展趋势。

关键词: 微操作机器人; 显微视觉; 研究现状与发展趋势

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

CURRENT SITUATION AND TREND OF MICRO MANIPULATING ROBOT

JIANG Ze-min, XU De, WANG Ling-kun, TAN Min

(Key Laboratory of Complex System and Intelligence Science, Institute of Automation, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

Abstract: With the trend of science and technology toward miniaturization and ultra precision, the importance of robot manipulation with precision ranging from macro to micro and nano has become recognized. Consequently, micro manipulating robot, integrated by both micro positioning technology and robot technology, will play vital role in the future. This paper presents the current situation and mechanical characteristics of micro manipulating robot. Moreover, the promising development in different fields is listed. To conclude, the development trend of micro manipulating robot in the future is discussed.

Keywords: micro manipulating robot; micro vision; current situation and development trend

1 引言(Introduction)

纳米技术(Nanoscience)是 21 世纪最重要的技术领域, 它将使人类步入分子、原子的操纵领域, 如生物细胞($10\mu\text{m}$ — $150\mu\text{m}$)及染色体的操作、微机电系统(MEMS)零部件($10\mu\text{m}$ — $100\mu\text{m}$)的装配、通讯领域中的光纤($\varnothing 125\mu\text{m}$)对接、微电子集成电路制造、显微外科手术等, 从而改变人类的生产、生活, 深刻影响民用和国防等科学技术的发展。而人类从宏观领域扩展到微观领域, 要实现对微观世界的操作, 其关键是研制能在微观尺度下对微小物体进行加工、装配、测试等的微操作系统^[1]。由微定位技术与机器人技术结合, 尤其是多自由度微定位技术与机器人技术结合而产生的微操作机器人技术是机器人技术发展的新的研究方向^[2]。

微操作机器人(Micro Manipulating Robot)是指机器人的运动位移在几微米和几百微米的范围内, 其分辨率、定位精度和重复定位精度在亚微米至纳米级的范围内^[2]。

2 微操作机器人的发展现状(Current situation of the micro manipulating robot)

微操作的研究开始于 20 世纪 30 年代, 当时为了研究细胞, 出现了一些气动、液压、机械式的微操作器, 如 Emerson 研制的机械式操作器, de Fontaine 的气动式微操作器, Cailloux 的液压式微操作器。这些操作器基本上是手动方式, 通过将操作手柄上的人手运动按比例缩小, 在末端工具上实现直接的精微运动^[3]。

20 世纪 80 年代末 90 年代初, 各国掀起了对微操作研究的高潮, 日本、美国、欧洲、韩国等都投入大量的人力物力对微观世界的物理法和微操作系统的机构、控制、驱动进行了大量的研究。现在研究的重点主要集中在微操作的机构、驱动和显微视觉控制上。

2.1 微操作机构

在微操作机器人结构中, 多自由度微操作手是微操作系统完成精密微操作的核心。1995 年日本

^{*} 基金项目: 受 863 项目(No. 2002AA430050)和博士后基金资助。

收稿日期: 2003—03—04

AIST 机器人机械技术研究室开发出了双指微操作手, 操作手的两个手指分别安装在微操作平台上(见图 1)^[4].

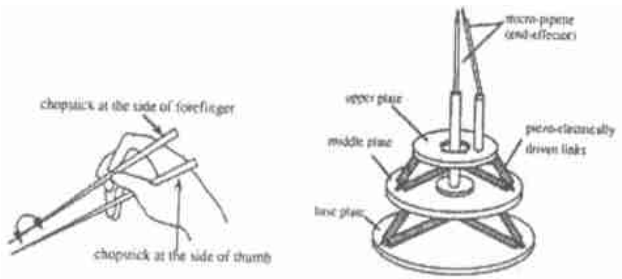


图 1 双指微操作器

Fig. 1 Two-finger micro hand

安装在中间平台上的微操作手相当于靠近拇指的筷子, 另一微操作手安装在上平台, 相当于靠近食指的筷子. 微操作手和平台由压电陶瓷驱动. 通过控制上平台的操作手, 可以实现精确定位, 定位范围在 $0.1\mu\text{m}$ 以内. 控制基座平台的压电陶瓷可以获得大

范围的运动. 1998 年意大利 MiTech 实验室开发出了 MIGRIP 系列微夹器(见图 2)^[5].

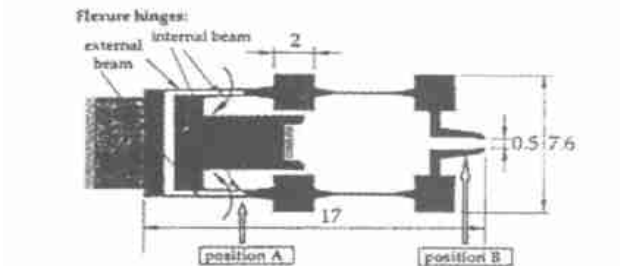


图 2 微夹器

Fig. 2 Micromanipulator

该微夹器也采用压电陶瓷驱动. 如图所示, 微夹器左侧由内外细横梁构成, 其中内细横梁长 2mm , 外细横梁长 4mm , 内外细横梁相当于柔性铰链, 通过控制这两个横梁的弯曲变形可以实现夹持操作. 1998 年, 芬兰 Tampere 大学研制出了压电液压双驱动 of 的平行三自由度的微操作手^[9], 其原理见图 3.

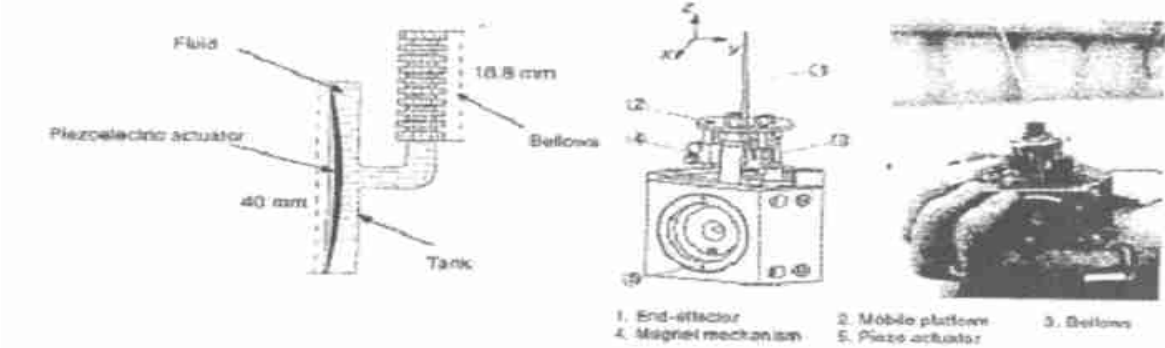


图 3 压电液压双驱动微操作手

Fig. 3 Piezohydraulic parallel micromanipulator

压电陶瓷驱动器放置在液压油缸内, 当压电陶瓷弯曲变形时, 缸内液压油受压作用在金属片上, 放大位移. 微操作手安装在 Stewart 平台上. 2001 年日本 Nagoya 大学研制了具有 10 个自由度的纳米操作机械手(见图 4)^[7].

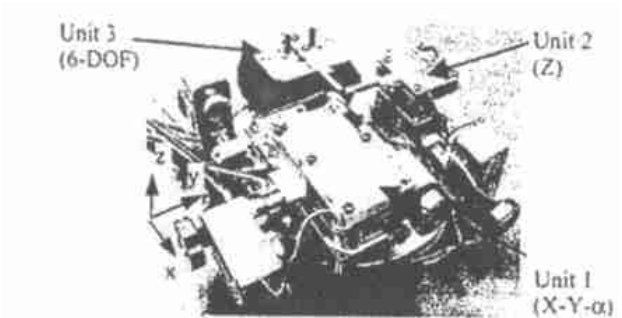


图 4 10 自由度纳米操作机械手

Fig. 4 Nanorobotic manipulator with 10 DOFs

其中 UNIT 1 由 3 个自由度, X, Y, Z 轴转动; UNIT 2 有 1 个自由度, Z 方向的平动; UNIT 3 有 6 个自由度.

2.2 微操作驱动

在驱动方面, 1995 年日本东京大学提出了磁场驱动微操作的概念^[8], 如图 5 所示.

采用永磁铁作为受动器, 磁铁大小与被操作的物体相当, 而且端部不固定. 在工作时, 通过控制流过矩形分布的螺旋线圈的电流来改变永磁铁周围的磁场, 当永磁铁周围的磁场改变时, 在磁力的作用下永磁铁开始运动, 夹持被操作物体. 由于永磁铁端部不固定, 因此可以获得相对于被操作物较大的运动范围、旋转角度, 同时可以夹持不同形状的物体. 1998 年, 美国 Berkeley 大学设计出了基于静电力场的并行微装配系统^[9], 该系统利用超声波震动减少摩擦力和吸附力的影响, 然后利用静电力精确定位,

排列零件. 2001 年美国 Rensselaer Polytechnic 研究院的 Jeongsik 提出了基于摩擦力场的微操作^[10]. 如图 6 所示.

采用二维排列的气动吸管产生摩擦力, 控制平台上的操作物, 气动吸管可移动. 采用摩擦力场控制微操作物可以不必设计夹持器. 日本 Nagoya 大学给微操手加上超声波震动完成生物切割, 采用这种方法在操作过程中不用改变操作手和物体的姿态就可以从多角度对物体进行切割(见图 7)^[11].

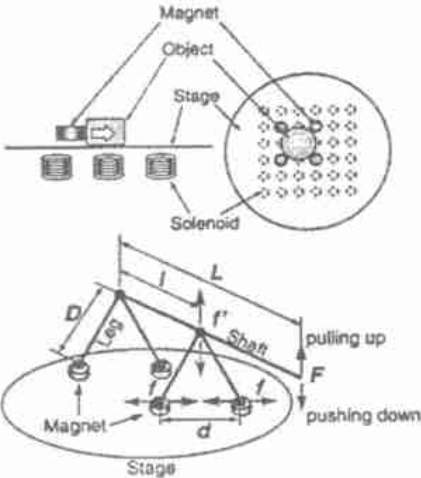


图 5 磁场驱动微操作

Fig. 5 Micromanipulation using magnetic field

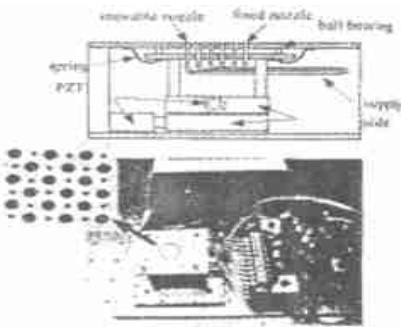


图 6 摩擦力场驱动微操作

Fig. 6 Micromanipulation using a friction force field

由于压电陶瓷具有结构紧凑, 体积小, 高分辨率, 高频响的优点, 近年来作为高精度微位移驱动器得到广泛的关注, 并研制出很多利用压电陶瓷驱动的微操作手. 如 1996 年日本 Gifu 大学 Sasaki 等以 Biomorph 型聚合压电驱动器构成微操作手, 建立了压电驱动器动态模型, 对驱动器采用了人工神经网络控制方法^[4]. 德国 Karlsruhe 大学工程控制机器人研究室的 Fatikow 为了实现微系统自动装配时达到高精度大范围的运动, 研制了多种压电驱动的行走式的微操作机构^[4].

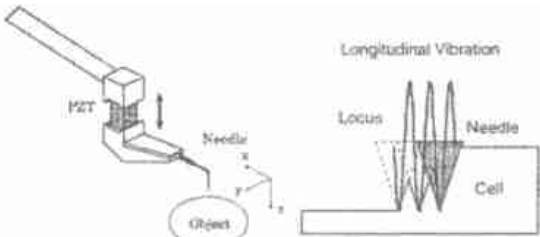


图 7 超声波微切割刀

Fig. 7 Microknife using ultrasonic

2.3 微操作显微视觉控制

在微操作系统中传统的检测定位方法难以实现, 往往采用光学显微镜、扫描电镜、隧道扫描显微镜作为检测定位系统, 即显微视觉控制. 光学显微镜可用于检测亚微米到 1mm 精度的微操作; 隧道扫描显微镜用于原子级的超微操作; 电子显微镜是用于精度从 1nm ~ 1μm 的中等精度操作. 目前国外已出现用于细胞操作、微机械装配、显微外科手术的微操作机器人. 如日本 Nagoya 大学微系统实验室设计的 3 维生物显微操作, 利用该系统可以完成 φ20μm 的玻璃球的操作(见图 8)^[12]. 日本东京大学设计的在扫描电子显微镜下视觉控制的微操作系统^[13].

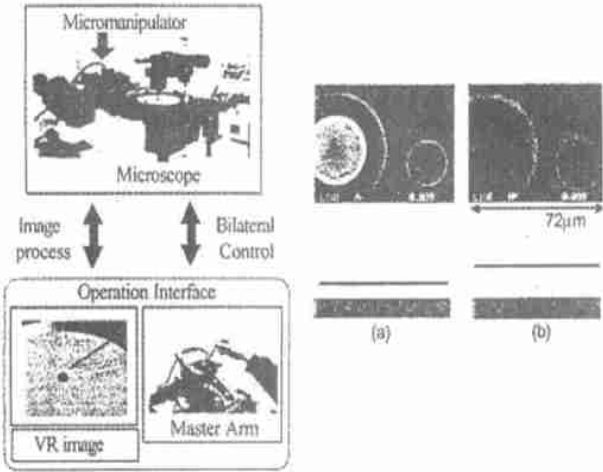


图 8 3 维生物显微操作

Fig. 8 3-D Bio-micromanipulation system

2.4 国内微操作发展现状

我国是在 20 世纪 90 年代开始研制高精度微动机器人的. 1993 年广东工学院杨宜民教授等首先研制出了仿生直线驱动器, 用于微进给机械加工^[14]. 在国家八六三高技术计划的支持下, 天津南开大学卢桂章教授等研制出了微操作机器人, 可以用于对微米级的细胞、胚胎、染色体实施操作. 据了解, 中国农业科学院已利用这种机器人成功实行了对植物细胞染色体的切割操作, 一些医学科研部门正在利用

它进行转基因实验(见图 9)^[15].



图 9 生物微操作机器人

Fig. 9 Bio-micromanipulating robot

哈尔滨工业大学机器人研究所在国家自然科学基金的资助下成功研制出仿生型多维超精密驱动微机器人,并在国内首次研制出运动精度在纳米级的六维并联结构的微操作机器人(见图 10),可用于光纤调整、细胞操作,具有很大的产业化价值^[16,17].北京航空航天大学机器人室在自然科学基金资助下也开展了六自由度并联微操作机器人的研究^[17].

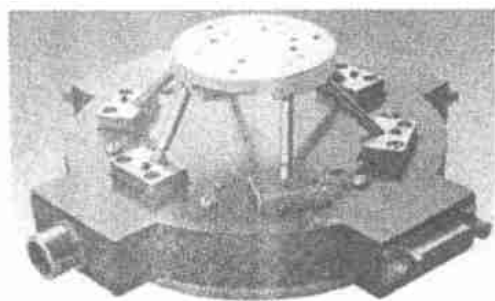


图 10 六自由度并联机器人

Fig. 10 6-DOFs parallel robot

但是,由于我国基础制造业水平仍然较低,在制造和应用高精度微动机器人方面,仍与国外有一定差距,从总体上说还处于起步阶段.

3 微操作机器人的结构特点(Structure features of the micro manipulating robot)^[18~20]

3.1 微操作特点

微操作机器人的运动位移在几微米至几百微米的范围内,微小物体的整体或部分精度在微米或亚微米级,因此,必须借助显微镜才能实现对操作对象进行观察和操作.和宏操作相比,有本质的区别:

(1)由于操作对象几何尺寸的微小化,静电力、摩擦力、表面张力等表面力起主导作用,而重力、惯性力等体积力起次要作用,甚至不起作用,这是微观操作的尺度效应.

(2)由于操作对象质量很小,且构造薄弱,因而不宜对其施加过大的力;空气阻力相对其重量而言可能较大,因而在进行作业时,有抓取操作,同时又有释放操作.

(3)由于操作对象很小,尤其是在 0.5 毫米以下时,肉眼很难看清其形状、位姿,因而必须借助显微镜才能实现微细作业.

(4)为了灵活地改变操作对象的位姿,实现操作过程的多自由度、高精度调整,要求操作机器人具有多自由度,其操作灵活,便于调整,运动精微.

(5)由于操作对象较小,人很难准确掌握操作环境和操作对象的情况,因而微操作系统需要通过一定的方式(声、光、力)将操作的接触力等信息传递给操作者.

3.2 微操作系统构成

由于微操作机器人具有以上的特殊性,其微细作业系统的基本结构有显微视觉系统、微操作器、作业台等三部分构成,系统结构有以下的特点和功能:

(1) 显微视觉系统

微操作机器人显微视觉系统主要有显微镜、摄像头、监视器和图像采集卡组成.

°高倍率、高分辨率:机器人在微操作时,不但要获得微小对象的形状、位姿、以及作业台和工具间的距离等视觉信息,而且在立体作业时,监视装置应能提供立体信息,因此显微镜大多采用高倍率、高分辨率.

°视野内任意作业:显微操作的作业空间很小,必须在监视装置的视野范围内.而使用光学显微镜,倍率、分辨率越高,视野、动作距离越小,采用 1000 倍的倍率时,动作距离约为 20 毫米.因此,显微作业系统必须能在视野内进行任意作业.

°视觉控制:通过固定在显微镜上的摄像机(CCD)摄取检测图像并经图像采集卡 A/D 转换成数字信号,由计算机软件对数字图像进行数字信号处理,得到所需的各种目标图像特征值,实现模式识别、坐标计算、灰度分布图等多种功能,完成微操作的监控和精确检测定位,尤其是视觉伺服控制.摄像机的放大倍率、焦距、景深是摄像机参数的重要指标.高品质的图像处理硬件是实时控制中的关键.

(2) 微操作器

微操作器应能够在视野范围内进行任意作业、改变对象物位姿、任意把持和脱离对象物,而且必须具有高灵敏度、高刚性的特点.

°旋转自由度:为了能任意改变对象物的位

姿,微操作系统应具有较大范围的旋转自由度;为了实现视野内进行任意作业,工具的前端应在显微镜的视野中心,被把持的对象物应能够在视野内旋转,姿态能够改变.姿态精度与通常作业要求一样.

°工具:由于在微操作中对象物微小,因此工具与对象物的接触部分也应小.利用静电力、表面张力等进行吸附(把持)是简单的方法,但要使其脱离就较难,因此,微操作机器人必须配有合适的工具,具有任意把持、脱离操作物的功能.

(3) 作业台

进行微细作业时,微小对象物必须在通常尺度和微小尺度空间进行切换,因此,作业台不仅能够移动对象物,而且还应能够调和通常尺度世界和微小尺度世界的矛盾.

°大的动作范围:为了把对象物移到作业空间(显微镜视野范围),作业台应装备大动作范围的平动机构,实现机器人的运动范围.

°高的定位精度:由于对象物微小,作业台的定位精度要求很高,才能完成精确定位.

4 微操作机器人的应用 (Applications of micro manipulating robot)^[2]

微操作机器人结合了微定位技术、机器人控制技术、机器人传感技术和机器人视觉技术,拓展了机器人的应用范围.同时其技术涉及到精密机械、机器人、计算机、自动控制、精密测量等多学科领域.因此,在生物工程、医学工程、微型机电系统、光学、超精密加工及测量(如:扫描隧道显微镜)等方面都具有广阔的应用前景^[2].

医疗机器人与计算机辅助医疗外科技术是近几年在多学科交叉领域中兴起,并越来越受到关注的机器人应用前沿研究课题之一.采用带有传感器的微机器人系统完成显微外科手术,可大大减轻医生负担,缩短手术时间,提高成功率,其中由于病人失血少、伤口愈合快,同时也可降低病人恢复所需的费用,是未来外科手术的发展方向.文献[21]中的头颅手术机器人(见图11),文献[22]中的应用于神经外科手术中的微介入机器人(见图12)都是这种微操作机器人.

在生物工程领域中,基因转移、基因诊断、基因治疗、动物克隆和染色体分析、人工授精等都要求对只有几微米的单一游离的细胞进行操作,其关键动作是接近细胞时的精细微调,要求分辨率达几十纳米,微操作机器人具有高定位精度和精细操作能力,

适于完成上述操作.而且采用微操作机器人完成细胞级的操作,不仅可提高效率,而且还可以打破只有少数人可为的局面,真正实现生物的工程化.现在,已出现了商业化的生物微操作机器人,并成功应用于生物工程中,如文献[23]中的三维生物微操作机器人,可以在三维虚拟环境中完成细胞的操作.

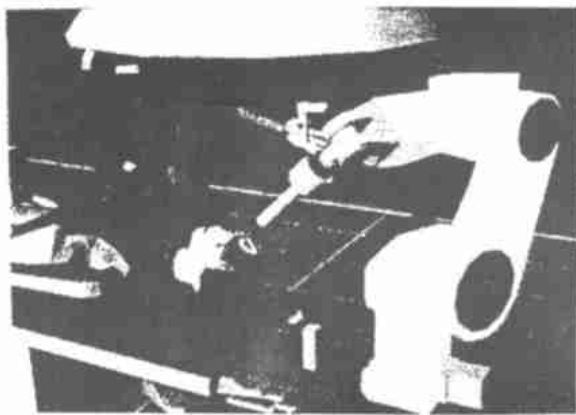


图 11 头颅手术机器人

Fig. 11 A safe robot system for craniofacial surgery

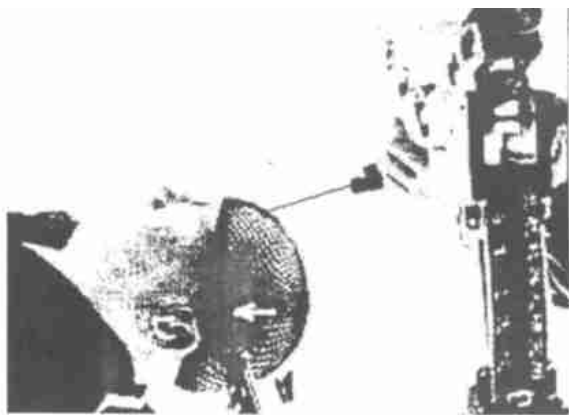


图 12 神经外科微介入机器人

Fig. 12 Robot-assisted Minimally invasive neurosurgery

随着现代机电产品不断向微型化、集成化和精细化方向发展,传统的方法很难完成高精度产品的加工、封装及装配,而且对操作者的技术、劳动强度都有很高的要求,工作效率很低,操作工人的培养往往需要较长的时间.微操作机器人系统将在这一领域发挥重要作用.文献[24]研究了机械装配的微规划,文献[25]研究了三维纳米结构物体的分层装配方法.

在网络和数字时代,光纤是现代信息高速公路中的信息传输媒介.由于光纤的体积仅十几立方厘米,因此对接校准的困难,必须借助一种特殊的精微校准平台(精度达 $0.1\mu\text{m}$),这种精密校准平台事实上就是一套微操作机器人系统,光纤的对接由左右

微操作手协调完成, 使光纤和器件之间达到最佳耦合功率位置, 并自动补偿这一过程的任何误差. 文献 [2] 中介绍了光纤对接机, 如图 13、14 所示.

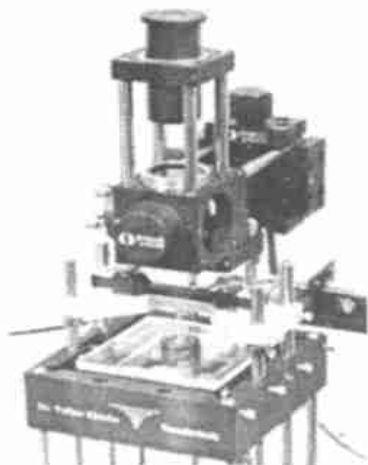


图 13 光纤对接机

Fig. 13 Machine for optical fiber connecting

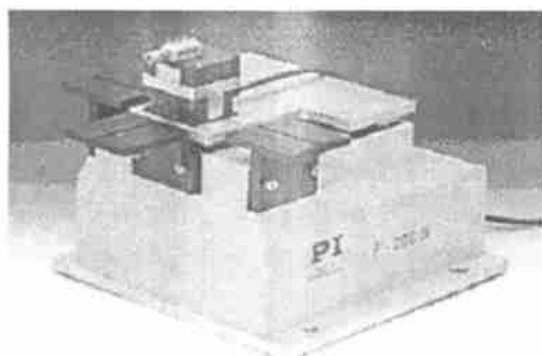


图 14 六自由度并联式微米级微定位系统

Fig. 14 6 DOFs parallel micro positioning system

5 微操作机器人的发展趋势 (Trend of the micro manipulating robot)

随着微电子技术、生物技术的发展, 微装配和微操作技术将日益显示其重要性. 微装配和微操作技术在过去的十年里得到了长足的发展. 但是目前对有关理论和应用的研究还远远不够, 在机器人运动学实时标定与测量、显微视觉伺服控制、控制理论方法、新材料、驱动等方面都还有许多问题没有得到完全解决.

未来的发展方向应当是融合微电子、材料、精密机械、精密测量、自动控制、机器人、计算机等多学科技术来解决微观领域的问题. 基于视觉伺服的微操作机器人控制将是微操作机器人研究新课题, 最终实现微操作机器人的可靠自主操作目标, 而且使用简单、精度高、控制方便、工作可靠、生产成本低.

参考文献 (References)

- [1] 毕树生. 面向生物工程的微操作机器人系统研究[D]. 北京航空航天大学博士学位论文, 2002.
- [2] <http://www.bsjn.com.cn/05/00.htm>.
- [3] 赵玮. 面向生物工程的微操作机器人系统的控制[D]. 北京航空航天大学博士学位论文, 2001.
- [4] Tannio TANIKAWA, Tatuo ARAI, *et al.* Two-finger micro hand[A]. Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Leuven, Belgium; 1995. 1674—1679.
- [5] Carrozza M C, Dario P, Menciassi A, Fenu A. Manipulating biological and mechanical micro-objects using LIGA-microfabricated end-effectors [A]. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Leuven, Belgium; May 1998. 1811—1816.
- [6] Pasi Kallio, Mikael Lind, *et al.* A 3 DOF piezohydraulic parallel micro-manipulator[A]. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Leuven, Belgium; May 1998. 1823—1828.
- [7] Lixin DONG, Fumihito ARAI, and Toshio FUKUDA. 3D nanorobotic manipulations of multi-walled carbon nanotubes[A]. Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Seoul, Korea; May 2001. 632—637.
- [8] Tadanobu Inoue, Kazuhiro Iwatani, *et al.* Micromanipulation using magnetic field[A]. Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Leuven, Belgium; 1995. 679—684.
- [9] Karl-Friedrich Bohringer, Ken Goldberg, *et al.* Parallel microassembly with electrostatic fields[A]. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Leuven, Belgium; May 1998. 1024—1029.
- [10] Jeongsik Sin, Tobias Winther, Hany Stephanou. Micromanipulation using friction force field[A]. Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Seoul, Korea; 2001. 115—120.
- [11] Fumihito Arai, Takaharu Amano, *et al.* Mechanical micro-dissection by microknife using ultrasonic vibration and ultra fine touch probe sensor[A]. Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Seoul, Korea; 2001. 139—144.
- [12] Fumihito Arai, Akiko Kawaji, *et al.* Three-dimension bio-micromanipulation under the microscope[A]. Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Seoul, Korea; 2001. 604—609.
- [13] Takeshi Kasaya, Hideki Miyazaki, Shigeki Saito, Tomomasa Sato. Micro object handling SEM by vision-based automatic control[A]. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Detroit, Michigan; 1999. 2189—2196.
- [14] 王守杰. 微操作机器人级显微视觉的研究[D]. 北京航空航天大学博士学位论文, 1998.
- [15] <http://www.lnzy.ln.cn/XYSD/computer/it/5/china.htm>.
- [16] <http://news.hit.edu.cn/54/2002/540525070916/>.

根据 g_L 的定义, 有

$$g_L = \{ R_i: R_i \text{ 不在 } g_0, g_1, \dots, g_{L-1} \text{ 中} \}$$

显然 $L+1 \leq n$ (机器人的个数), g_0, g_1, \dots, g_L 是 R 的一个划分, g_0 表示直接 (亲眼) 看到目标且中途无障碍的机器人集合; g_1, \dots, g_{L-1} , 表示间接看到目标且中途无障碍的机器人集合。

经过对机器人集合 R 的重新划分, 就可以使用 4.4 中的“改进的队形控制算法”。

6 结论 (Conclusion)

本文讨论了多机器人协作形成任意队形的分布式自主队形改进的控制算法。在文献 [3~5] 提出的多机器人协作捕获猎物的弧形队形控制算法的基础上, 针对其存在的问题, 给出了解决办法, 提出一种改进的系统模型和控制算法, 并扩展了算法的使用范围。相对于文献 [3~5] 的算法, 本文提出如下几点改进: (1) 给出了系统模型中 L 的计算方法, 指出在整个机器人的运动过程中 g_k 是动态变化的, 各个机器人必须经过通信才能确定 g_k 的组成; (2) 给出三种用于确定跟踪对象的策略, 可减少冲突和等待时间, 提高算法效率; (3) 修正了机器人集合的划分定义, 模型和算法能够适用于各种对象具有不同高度的情形, 更接近实用化。

下一步的研究工作: (1) 如何将该算法推广到三维空间中; (2) 当 g_k 确定后, 各个机器人采用什么方

法来确定 g_k 的哪一个机器人作为跟踪对象。

参考文献 (References)

- [1] Ota J, Miyata N, Arai T, Yoshida D, Kumbayashi S, Sasaki J. Transferring and regrasping a large object by cooperation of multiple mobile robots [A]. In: Proceeding of 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. Pittsburgh, Pennsylvania: IEEE, 1995. 543—548.
- [2] Yamashita A, Fukuchi M, Ota J, Arai T, Asama H. Motion planning for cooperative transportation of a large object by multiple mobile robots in a 3d environment [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. San Francisco: IEEE, 2000. 3144—3151.
- [3] Yamaguchi H. A cooperative hunting behavior by mobile-robot troops [J]. The International Journal of Robotics and Research, 1999, 20(9): 931—940.
- [4] Yamaguchi H. A cooperative hunting behavior by mobile-robot troops [A]. In: Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Washington DC: IEEE, 1998. 3204—3209.
- [5] 韩学东, 洪炳熔, 孟伟. 多机器人任意队形分布式控制研究 [J]. 机器人, 2003, 25(1): 66—72.

作者简介:

韩逢庆 (1968-), 男, 重庆大学自动化学院博士研究生, 重庆工学院计算机系副教授, 研究领域: 智能系统。

李红梅 (1968-), 女, 硕士, 重庆工学院计算机系副教授, 研究领域: MIS、最优化技术。

李刚 (1968-), 男, 硕士, 重庆工学院计算机系讲师, 研究领域: 机器人。

(上接第 559 页)

- [17] <http://news.hit.edu.cn/54/2002/540525070916/>.
- [18] 黄亚楼, 卢桂章. 机器人和精密操作的研究与发展 [J]. 机器人, 1992, 7: 53—59.
- [19] 张涛. 微操作机器人系统的研究及在微装配中的应用 [D]. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1999.
- [20] Tomomasa SATO, Takayuki KAMEYA, Hideki MIYAZAKI, *et al.* Hand-eye system in nano manipulation work [A]. Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Leuven, Belgium: 1995. 59—66.
- [21] Engel D, Raczowsky J, Wom H. A safe robot system for craniofacial surgery [A]. Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Seoul, Korea: 2001. 2020—2024.
- [22] Da Liu, Tianmiao Wang. Study on robot-assisted minimally invasive neurosurgery and its clinical application [A]. IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Seoul, Korea: 2001. 2008—2013.
- [23] Fumihito Arai, Tomohiko Sugiyama, *et al.* 3D viewpoint selection and bilateral control for bio-micromanipulation [A]. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. San Francisco: 2000. 947—952.
- [24] Gupta S K, Paredis C J, Brown P F. Micro planning for mechanical assembly operations [A]. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Leuven, Belgium: May 1999. 239—246.
- [25] Requicha A A G, Meltzer S, Resch R, *et al.* Layered nanoassembly of three-dimensional structures [A]. Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Seoul, Korea: May 2001. 3408—3411.

作者简介:

江泽民 (1975-), 男, 博士生, 研究领域: 计算机视觉、显微操作等。