

文章编号 1004-924X(2002)02-0171-05

微操作机器人显微视觉系统若干问题

孙立宁, 陈立国, 刘品宽, 荣伟斌

(哈尔滨工业大学 机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 显微视觉系统是微操作机器人不可缺少的组成部分。近年来, 随着显微技术的不断成熟, 显微视觉系统的研究已经成为国内外在微操作领域的研究热点。本文着重介绍了微操作机器人显微视觉系统的研究意义, 总结了现阶段国内外的研究现状, 提出了显微视觉系统亟待解决的一些关键问题, 并对这些关键问题的解决方案进行了探讨。同时, 对显微视觉系统的发展前景和方向进行了展望。

关键词: 机器人; 微操作; 显微视觉; 显微镜

中图分类号: TP242.62 文献标识码: A

1 引言

随着显微镜技术、精密测量、精密定位以及精密加工等技术的快速发展, 电子、机械、医学、生物和物理等方面所研究的对象已经逐渐由宏观世界进入微观领域。因此, 微观对象的加工装置和对微观世界本质的理解已经逐渐并受到普遍关注。操作对象的微小化迫切要求进行以微小物体为操作对象的微操作技术及装置的研究。

微操作机器人系统是一个集机器人操作手、力感觉系统、显微视觉系统为一体的微型物体作业系统, 在微型零件装配、细胞操作、集成电路组装等技术领域有广泛的应用前景和重要的研究意义。因此, 微操作技术已经成为目前国内外的研究热点。然而, 现有的微操作系统所涉及的视觉系统大多只起到一个监测作用。其操作控制方式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。这套监视系统通过操作者的眼睛、大脑和手形成一个大的控制闭环, 这样, 整个系统的控制精度和效率就不可避免地受操作者的精神状态、熟练程度影响。另外, 操作对象质量小, 构造薄弱, 因而对其施加的力不宜过大, 这就要求对操作对象和操作手的形状、位姿, 位置等进行精确定位, 以免因接触力过大或操作位置不准确造成对操作对象的损坏。因此在原有系统基础上增加视觉反馈信息尤为重要, 这种视觉信息的集成也将为微

操作系统的半自动化和自动化打下技术基础, 并对微小对象的安全、稳定及准确操作具有重要意义。

2 显微视觉系统研究现状

随着对微观领域探求的意识不断加强, 对微小零件和细胞等微小物体的操作工作已经逐渐开展起来。然而, 在现有基础上通过显微镜对微小物体进行操作还有一定困难。

2.1 微操作机器人显微视觉系统框架

微操作机器人是在无法确定的环境下完成自动化操作任务。因此, 视觉系统在微操作系统中是极为必要的, 我们把它叫做微操作显微视觉系统。如图1所示, 微操作机器人显微视觉系统主要有以下几部分组成:

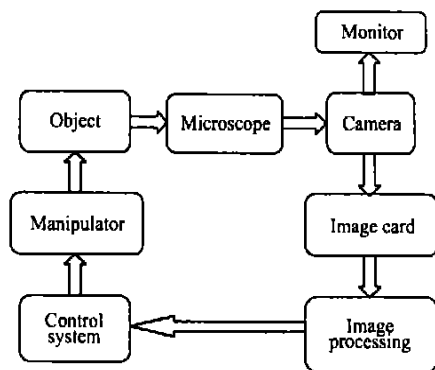


图1 微操作机器人显微视觉系统

Fig. 1 Micro-vision system of the micromanipulation robot.

(1) 能完成对被操作物体精确移动、旋转、抓取、放下等操作的操作系统;

(2) 有足够分辨率、并能从多方向观察操作对象的显微镜监视系统;

(3) 能不失真地记录操作过程和操作对象、操作工具位置信息的图像采集系统;

(4) 图像信息处理系统;

(5) 操作手控制系统。

各研究机构根据自己的操作对象并在原有微操作的基础上建立了各自的显微视觉系统。各显微视觉系统的组成虽略有不同,但均是在上述几方面基础上构建的。

2.2 国内外研究进展

根据操作对象不同,各自的视觉系统也略有不同,大多数研究机构均是在原有微操作机器人基础上增加了视觉系统从而获得更好的控制效果以实现自动化、半自动化操作。

日本通产省机械技术研究所与大阪大学合作在研制双指微操作机器人基础上增加光学显微镜,通过 CCD 摄像机获得指尖和微操作物体的平面位置信息,将这一信息传给控制系统实现对细胞的自动化操作。此外还构建了显微镜的自动聚焦装置,对图像质量进行优化。该系统完成了直径 $2\mu\text{m}$ 的玻璃球的抓取和在任意位置的放置操作实验;东京大学研制了纳米机器人系统的纳米手眼系统,该系统由实时视觉跟踪处理器、实时图像处理、扫描电子显微镜(SEM)、光学显微镜和主从操作手构成。SEM 作为主监视器对主从手平面信息进行跟踪测量,光学显微镜作为从监视器对垂直方向的深度信息进行监视。在纳米手眼系统帮助下,已经实现了直径 $10\mu\text{m}$ 的微粒子摆放操作和 $3\mu\text{m}$ 宽直线刻线工作;日本冈山大学以细胞操作为目标,以 2mm 直径的种子为试验操作对象,以 0.6mm 直径, 20mm 长的细针作为操作工具进行细胞微操作的模拟试验。体式显微镜外接两个 CCD 摄像机构成视觉监视系统,通过监视系统对细针针尖的三维位置信息进行观察和测量。

欧洲各国也在视觉方面进行了深入研究。德国卡尔斯鲁厄大学(Karlsruhe)研制了 Miniman 机器人。原有 Miniman I 型机器人和 Miniman II 型机器人是压电陶瓷驱动下五自由度机器人。该机器人可以实现精密移动,再配以管状操作手后

可以精确完成微操作任务。Sergej Fatikon 教授等人在此基础上增加了视觉传感器和力觉传感器,研制了 Miniman II 型机器人。在视觉系统引导下,机器人可在光电显微镜或扫描电子显微镜下完成 10nm 以下的高精度微操作,安装微夹持器后可以对微小物体进行高精度夹持、搬运、操作和定位。该研究小组将视觉系统分为全局和局部传感器系统进行分别研究并在微视觉系统下的目标识别和深度信息获取方法等方面进行了探讨。该系统配上吸管后实现了对 $\varnothing 20\text{mm}$ 的细胞进行拾取、移动和定位等操作;瑞士洛桑大学采用激光扫描显微镜作为监视装置,利用激光直接测量高度信息,根据图像获得平面信息。同时,在视觉信息基础上开展了微小型机器人微操作的虚拟现实技术的研究。

相对国外,国内研究起步较晚,直到最近才有微操作视觉方面的相关研究报道出现。北京航空航天大学、南开大学首先以生物细胞为研究对象,在视觉系统的伺服控制、深度信息获取方法等方面进行了探讨。哈尔滨工业大学以微机械零件装配为操作目标,以体式显微镜作为监视系统进行了视觉系统的研究。

视觉系统的发展一直都受到国内外研究机构的重视,但目前为止,总体来说微操作显微视觉系统还存在很多问题,对显微视觉系统的深入研究已经成为当前微操作研究的紧迫任务之一。

3 显微视觉系统的关键问题

3.1 显微镜的选用

微操作对象的尺寸微小限制我们只能在显微镜下才能精确获得它的位置、方向、与操作工具的距离甚至微操作对象的存在等信息。因此,显微镜是微操作视觉系统不可缺少的工具。然而显微镜种类很多,对显微镜的选择直接影响微操作的精度、方式等方面。

从某种意义上讲,显微镜可分为传统光学显微镜和立体显微镜两类。它们之间有很大区别。

(1) 观察角度。传统光学显微镜只提供了一个观察方向,因此只能获得平面信息。体式显微镜提供了两个略有差别的角度进行观察,由于两幅图像存在视差,因此能类似人的双眼一样获得物体的三维信息(景深)。而光学显微镜即使提供

两个观察口,由于两幅图像完全相同,也只能获得平面投影信息。

(2) 光源。传统显微镜通常使用背透光源,因此要求被观察对象是透明或半透明的,如细胞等。体式显微镜一般采用反射光源,所以操作对象可以是不透明的微机械零件、或物体表面等等。

(3) 放大倍数。传统光学显微镜的放大倍数在 50~1200 倍之间,因此观察对象可以是细菌等人眼无法看到的微物体。体式显微镜的放大倍数在 8~50 倍之间,观察对象不能过于细小,一般是针对人眼可以观察但无法得到准确信息的对象,如微机械零件等等。

(4) 调整难度。传统显微镜观察时可以通过更换目镜、物镜来调整放大倍数,一旦应用到微操作,通过 CCD 获取图像,就只能通过更换物镜来调整,因此通常放大倍数是固定的。而体式显微镜一般都采用了连续变倍系统,可以通过这套系统调整视野。

通过以上对比可见,操作对象不同就要求选用不同的显微视觉系统。但一般都应遵循以下原则,即对肉眼无法看到的细菌等生物物质为操作对象的微操作系统只能选用传统光学显微镜。肉眼可见的微零件的装配与操作及尺寸较大的细胞等均可尽量采用立体显微镜。

当然,随着显微技术的不断发展,相继出现的扫描电子显微镜、激光扫描显微镜等都给微操作系统提供了技术保障,可根据需要进行相应的选择。

3.2 视觉系统的自标定

对于微操作机器人系统而言,它的操作对象、操作工具都是微米级的,确定这些目标的尺寸及在操作空间中的实际位置将十分困难,因为这不不仅仅要求标定的精度非常的高(微米级、纳米级),而且由于操作空间的狭小,其他传感器件很难安装,只能依靠视觉传感器进行标定。但是,操作过程中放大倍数的调整、操作手位置和被操作对象的位置改变,都将对测量造成意想不到的影响,因此要求当操作工具和操作对象位置改变,显微镜调整等情况发生时,都应重新对操作空间进行标定,避免因此造成的误差。另外,在微操作系统设计、加工、装配及控制过程中出现的多个坐标系系统:微操作手坐标系、载物台坐标系、显微镜物镜坐标系、成像平面坐标系、计算机屏幕坐标系等等

需要复杂的坐标系转换。因此快速、准确的自标定算法对视觉系统的标定显得尤为重要。

3.3 目标搜寻和自动聚焦

由于微操作视觉系统采用显微镜作为监视传感器,而显微镜本身具有视野范围小、景深短的缺点,因此,操作工具和操作对象的移动极有可能移出视野使得自动操作无法进行。另外,显微镜景深短,使得稍有误差的对象图像变的模糊不清,如果仅仅依靠操作员的主观判断,对操作者的要求就较高,而且具有很大的人为误差,这对于严格要求测量精度的场合来说是致命的缺陷,将直接降低测量精度。这就要求对每一被检对象进行目标搜寻和自动聚焦的调整。自动聚焦技术在傻瓜式相机中常有应用,但由于精度不够无法在显微镜中使用。应用图像分析与处理技术可在这方面提高精度。

所谓自动聚焦的过程,就是找到合适的自动调焦评价函数。这一函数应具备较强的抗干扰能力,在所需的调焦范围内具有唯一性、无偏性。常用的评价函数有:有效像素函数、均方差函数、能量函数等等,但这些算法都是根据特有图像进行选择的。对微操作而言,对象不同可选择不同的评价函数以实现最好的调焦效果。

3.4 视觉信息处理速度问题

实现视觉伺服控制的主要障碍在于图像数据的采集和处理延时上,对于微操作来说更为突出。显微镜的光学性能、载体的透光品质、外界震动及环境因素的影响等等都使得图像数据处理的延时更长。据统计,显微视觉系统每秒钟处理 8 帧图像已属不易。因此,提高视觉系统的处理速度和伺服系统的控制速度问题极为重要。

现有情况来看,单单依靠开发速度较快的软件算法仍难以达到要求,使用 DSP 等开发硬件图像处理将是一条必经之路。

3.5 深度信息获取方法

深度信息如何获得一直是困扰微操作发展的一个问题。从现有资料看大致有以下几种:

(1) 焦点变换(depth-from-focus)。由于被检对象在焦面时的图像最清晰,尺寸也最接近实际尺寸。当对象远离焦面时,图像上反映出来是物体尺寸变大。根据这一原理,在光轴方向确定一基准面,以工作台上标准件和操作工具上的标准孔在光轴方向移动时的尺寸变化判断深度变

化。

(2) 借助其他硬件获取。在光学显微镜上安装激光器、超声波发生器等。根据某一点的图像信息和激光器或超声波发生器等获得信息融合起来,得到物体上某一点的深度信息。

(3) 立体视觉方法。这种方法也是微操作机器人中普遍采用的方法。原理就是根据多视角的同一物体的图像具有视差得到三维信息。根据显微镜的使用不同,这种方法也有两种主要形式:一是通过水平方向和垂直方向分别放置显微镜。如图 2 所示为东京大学采用的显微视觉示意图。图中的第二显微镜主要用来观察深度信息。另一种方式是采用体式显微镜作为观察传感器,这样可通过立体匹配等视觉原理进行三维信息的获取。

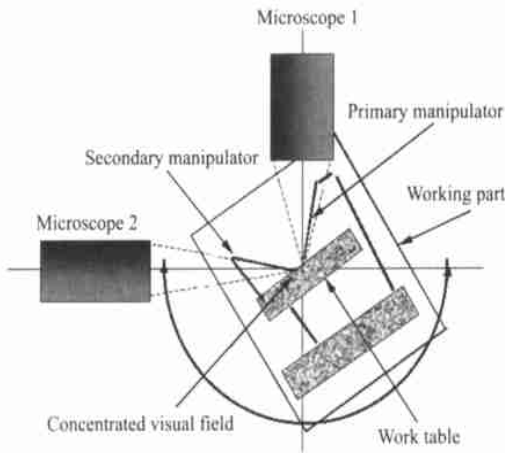


图 2 东京大学显微视觉系统示意图

Fig. 2 Sketch of the micro_vision system of Tokyo University.

根据以上分析,焦点变换方法无法达到很高精度,而且实现起来比较困难,借助硬件方式造价较高,同样存在精度问题。随着体式显微镜的技

术逐渐成熟,立体视觉方法的优势将使其成为微操作视觉深度信息获取方法的主流。

3.6 信息融合技术

为了实现机器人微操作手的拾取、移动、放下等操作,必须在操作之前和操作过程中得到操作对象的位置、形状等信息。视觉传感器和力觉传感器是经常使用的信息获取方法。视觉传感器主要用来获取操作手和操作对象之间的位置关系等几何信息。而当操作任务是拾取不同形状的操作对象时,力觉传感器经常被使用。视觉传感器如 CCD 摄像机等主要是感知非接触全局几何信息。但是它的灵敏程度取决于光照情况和其他一些环境因素。因此,可靠性不是特别高。而力觉传感器等接触式传感器更适于用来感知接触力等局部信息。而且,它的可靠程度不取决于环境条件,可靠性较高。由此,将这两种传感器甚至更多种类传感器的信息进行融合可以在不同的环境下得到更大的可靠性。传感器信息融合技术是一门较新学科,它的发展将大大加快微操作技术的发展步伐。

4 结 论

本文对微操作机器人显微视觉系统的发展现状进行了综述,提出了显微视觉系统亟待解决的关键问题,并探讨了解决方案。通过这些分析可见,显微视觉系统仍处于研究阶段,它把立体视觉理论、图像处理理论、模式识别技术、显微镜技术、电子技术、传感器信息融合技术等融为一体,现已成为国内外研究的热点问题。相信,在不远的将来,显微视觉技术的成熟必将为微操作机器人的发展带来巨大动力。

参考文献:

- [1] Sano T. A visual feedback system for micromanipulation with stereoscopic microscope[A]. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*[C]. 1998. 1127- 1132.
- [2] Sato T, Kameya T. Hand-eye system in nano manipulation world[A]. *IEEE International Conference OnRobotics and Automation*[C]. 1995. 59- 66.
- [3] Koyano K, Sato T. Micro object handling system with concentrated visual fields and new handling skills[A]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*[C]. 1996. 2541- 2548.
- [4] Tanikawa T, Arai T. Development of vision system for two_fingered micro manipulation[A]. *IEEE Proc. IROS* [C]. 1997. 1051- 1056.

- [5] Fatikow S, Buerkle A, Seyfried J. Automatic control system of a microrobot-based microassembly station using computer vision[A]. *SPIE Conference on Microrobotics and Microassembly*[C]. 1999. 11- 22.
- [6] Vikramaditya B, Nelson B J. Visually servoed micropositioning for robotic micromanipulation[J]. *Micromputer Applications*. 1999, 18(1): 23- 31.
- [7] Sano T, Nagahata H, Yamamoto H. Automatic micromanipulation system using stereoscopic microscope[A]. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*[C]. 1999. 327- 331.
- [8] Sano T, Yamamoto H. Study of micromanipulation using stereoscopic microscope[A]. *IEEE Instrumentation and Measurement Society*[C]. 2000. 1227- 1231.
- [9] Sano T, Yamamoto H. Micromanipulation using stereoscopic microscope[A]. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*[C]. 1999. 1066- 1069.
- [10] Sulzmann A, Breguet J M, Jacot J. Microvision system(MVS): a 3D computer graphic-based microrobot telemanipulation and position feedback by vision[J]. *SPIE*, 1995. 2593: 38- 49.
- [11] Kinoshita G, Ikhsan Y, Osumi H. Sensor fusion with aspect information of visual and tactual sensing[A]. *IEEE Intelligent Robots and Systems Conference*[C]. 1998. 1046- 1052.
- [12] 李贺桥, 张以谟, 容常青. 图像采集自动生物显微镜系统自动调焦的研究[J]. *光学学报*, 1995, 8: 1106- 1110.
- [13] 吴振峰, 左洪福, 邱根良. 光学显微镜自动聚焦的技术研究[J]. *光学仪器*, 2000, 22(4): 9- 12.
- [14] 王守杰, 宗光华, 毕树生. 微操作机器人显微视觉系统的研究[J]. *机器人*, 1998, 20(2): 138- 142.
- [15] 卢桂章, 张建勋, 赵新. 面向生物工程实验的微操作机器人[J]. *南开大学学报*, 1999, (9): 21- 24.

Some issues on the micro_vision system for a micromanipulation robot

SUN Li_ning, CHEN Li_guo, LIU Pin_kuan, RONG Wei_bin

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

Abstract: The micro_vision system is an important part of a micromanipulation robot. In recent years, with the development of micro_techniques, the study of micro_vision has become a focus. This paper introduces its significance and status in research fields at home and abroad, and discusses some key problems to be solved immediately and their solutions. It also predicts the outlook and trends of the micro_vision system.

Key words: robots; micromanipulation; micro_vision; microscopes

作者简介: 孙立宁(1964-), 男, 黑龙江人, 教授、博士生导师, 主要研究方向: 微操作机器人、微驱动技术、机器人学, 现任哈尔滨工业大学机器人研究所所长。