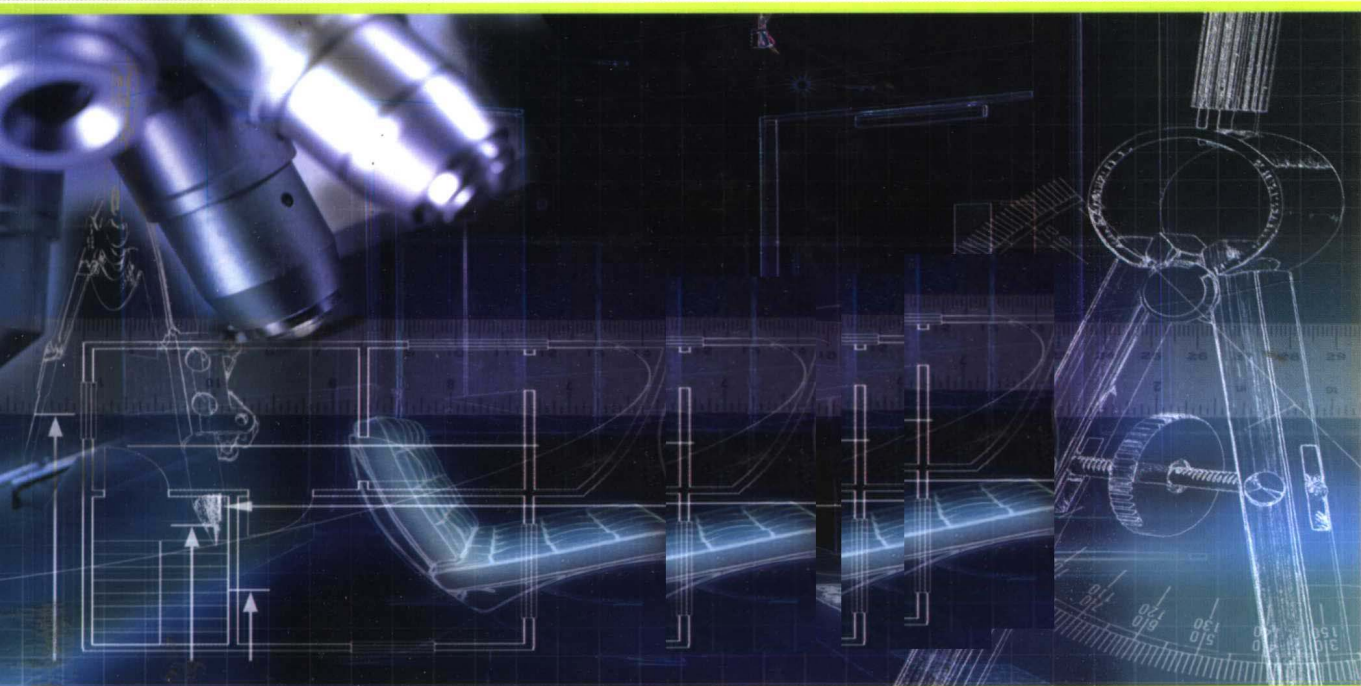


微装配与微操作

WEIZHUANGPEI YU WEICAOZUO

席文明 姚斌 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

微装配与微操作

席文明 姚斌 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书对微装配与微操作发展背景、特点、理论基础、微装配与微操作模型以及工具进行了较详细的叙述。

全书共分6章,其中,第1、2章主要对微装配与微操作的概念、起源、特点以及存在的困难进行了叙述和分析;同时,对微装配与微操作系统采用的技术、发展过程进行了总结。第3章主要是微装配与微操作的理论基础,包括机器人运动学、机器人视觉伺服、人工神经网络以及特征预测理论。第4章为微装配与微操作采用的各种控制模型,包括显微视觉伺服、视觉—力反馈微装配控制、虚拟微装配与微操作概念。第5章叙述了微装配与微操作中使用的工具,包括各种微手爪、微探针和微装配机械手,并对各种微力传感器进行了介绍。第6章分析了微装配与微操作的未来发展趋势,介绍了流水线微装配概念,并对磁悬浮微装配系统进行了分析。

本书对微装配与微操作技术进行了较全面的叙述和分析,在对涉及的理论和技术进行详细推导和论述的基础上,书中也采用了大量的图片,力求图文并茂,通俗易懂。通过这种方式,希望能够对各种层次的读者有所帮助。本书可供大专院校、科研院所的有关专业人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

微装配与微操作 / 席文明,姚斌编著. —北京:国防
工业出版社,2006.1

ISBN 7-118-04177-7

I. 微... II. ①席...②姚... III 微电机
IV. TM38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 110600 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 15¼ 350 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—3000 册 定价:28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

在制造业发展的初期,衡量制造业水平的标准是能否制造出大型、超大型的设备。随着各种技术的发展,这一标准发生了变化。对于一个制造业发达的国家,不仅要能制造出大型、超大型设备,也要能够制造出小型、超小型的高精密设备。这一方面是因为以前的制造业是粗放型的,消耗了大量的材料和能源;另一方面,研究者发现,许多小型、超小型设备协调工作,可以完成大型设备的功能。一个很好的例子是小型卫星,许多小型卫星协同工作,可以完成一颗大卫星的功能,而小卫星的制造成本和发射成本要远远低于大卫星。

地球上的能源和原材料非常有限,合理利用能源和原材料是当今制造业必须解决的关键问题。伴随着大众生活水平的提高,人们需要更好的医疗和保健条件。例如,采用普通的外科手术方法,患者的手术切口大、恢复时间长、医疗花费高,如果采用微创外科手术,就可以减小切口尺寸,缩短患者的恢复时间,节省大量的人力、物力和财力。微机电系统的出现,迎合了这种需求,它尺寸小,集成度和智能化程度高,不仅在传统工业领域中得到广泛应用,而且开辟了许多新的应用领域,这些领域包括通信、生物医学、环境检测和国防工业。它一出现,就受到了各国广泛的重视,有专家预言,微机电系统很有可能像当时的集成电路技术一样,将引发一场新的“以微见著”的产业革命。

微机电系统是建立在集成电路工艺基础上的新兴产业,在它的发展初期,主要是利用新的理论制造各种传感器和生物操作微探针,包括压力传感器、速度和加速度传感器、微陀螺、微探针阵列等。后来出现的 LIGA 技术、各种电化学加工技术、超高精度加工技术等,拓展了微机电系统的种类和应用领域,特别是在生物医学领域中的应用。相对于传统的微器件制造方法,这些技术最大优点是能制造出真正的三维微器件,而其最大不足是机械器件不能与控制电路做在一起,构成理想的微机电系统。要构成微机电系统,必须采用微装配技术,将微器件装配在一起。

微装配与传统的装配并不一样,这是因为器件的尺寸减小后,它的力学性质发生了变化。比如,传统的装配中,零件的重力占主导地位,它具有自定位能力,而微机电系统中的器件,重力的影响显著减小,静电力、表面张力和范德化力占统治地位。这些力不仅力学性质不清楚,而且会破坏器件的定位关系。如在抓一个这样的器件过程中,手爪没有和器件接触时,在静电力和表面张力作用下,器件会吸附在手爪上,而当手爪张开时,器件也不会自由释放。由于这些力的存在,使得微装配存在很大的困难,必须采用新的技术和理论加以克服。

由于微装配与微操作是一个新兴的研究领域,许多理论和技术仍处于研究中,限于个人的理解和知识面,书中肯定有许多不足之处,衷心希望广大读者对本书提出宝贵的意见和批评,对其中的不妥之处予以指正。

编著者
2005 年 7 月

目 录

第1章 概述	1
1.1 微装配与微操作的发展背景	1
1.2 微器件的物理学特点与特性分析	5
1.3 微装配与微操作的经济效益及存在的问题	6
参考文献	8
第2章 微装配与微操作系统简介	9
2.1 微装配与微操作系统组成	9
2.2 子系统的特点	17
参考文献	23
第3章 微装配与微操作理论基础	24
3.1 机器人运动学	24
3.1.1 空间描述和变换	24
3.1.2 机器人正运动学	28
3.1.3 机器人逆运动学	31
3.1.4 机器人雅可比矩阵	34
3.2 卡尔曼滤波器	39
3.2.1 介绍	39
3.2.2 未约束卡尔曼滤波器	40
3.2.3 约束状态估计	41
3.2.4 约束状态估计特性	43
3.2.5 非线性	46
3.2.6 约束卡尔曼滤波器应用	47
3.3 人工神经网络	47
3.3.1 人工神经网络	48
3.3.2 控制机械手运动的神经网络模型实现	49
3.3.3 一个机械手的视觉伺服	56
3.3.4 卡尔曼滤波器预测特征的分层小脑模型神经网络视觉伺服	62
3.4 视觉伺服	64
3.4.1 符号表示	64
3.4.2 摄像机坐标投影	66

3.4.3	图像特征和图像特征参数空间	67
3.4.4	伺服控制结构	68
3.4.5	基于位置的视觉伺服	70
3.4.6	基于图像的视觉伺服	73
3.4.7	图像特征提取和跟踪	78
参考文献		82
第4章	微装配与微操作控制模型	84
4.1	显微视觉控制方程的建立与 SSD 概念	84
4.1.1	显微镜成像模型	84
4.1.2	视觉雅可比矩阵推导	86
4.1.3	伺服控制方程建立	87
4.1.4	SSD 概念	88
4.2	微装配与微操作方法	90
4.2.1	深度信息的获取	90
4.2.2	局部视觉微装配方法	95
4.2.3	细胞操作方法	97
4.2.4	全局—局部视觉微装配方法	101
4.2.5	视觉—力反馈微装配方法	109
4.2.6	顺应微装配方法	113
4.3	虚拟微装配概念	123
4.3.1	力反馈手柄(触觉交互设备)	124
4.3.2	虚拟微装配方法	127
参考文献		130
第5章	微装配与微操作工具和设备	133
5.1	引言	133
5.2	微手爪	134
5.2.1	LIGA 手爪	136
5.2.2	放电加工(EDM)制造微手爪	139
5.2.3	各种微手爪的比较	143
5.2.4	LIGA 微手爪和 EDM 微手爪的安装与应用	145
5.2.5	硅微加工手爪	155
5.2.6	SMA 手爪	163
5.3	微探针	172
5.3.1	单个微探针制作	172
5.3.2	微探针阵列制作	177
5.3.3	微探针驱动与传感器设计	181
5.4	微操作机械手	184

5.5 磁悬浮微动平台	190
参考文献	194
第6章 微装配与微操作的发展趋势——流水线自动化装配	196
6.1 微装配与微操作存在的问题	196
6.2 流水线微装配系统	198
6.2.1 流水线微装配系统结构	198
6.2.2 流水线微装配系统中的传感器及移动机器人	201
6.2.3 流水线微装配系统中的器件排列	210
6.2.4 流水线微装配中的敏捷制造概念	215
6.3 流水线微装配系统中的磁悬浮技术	220
6.3.1 磁悬浮微装配系统的结构	220
6.3.2 磁悬浮导轨结构	222
6.3.3 磁悬浮导轨的控制	225
参考文献	235

第1章 概述

微装配(Microassembly)与微操作(Microoperation)是指对微小器件的装配和对细胞与生物组织的操作,具体的说就是装配和操作毫米以下纳米以上的微器件。微装配与微操作是与宏装配(Macroassembly)相对应的,所谓的宏装配是指对较大零件的装配,就是人们所说的传统装配。由于微装配与微操作的对象微小,它与传统的宏装配是完全不同的。主要表现在器件的物理特性发生了变化,当器件的尺寸小于毫米时,器件的重力可以忽略,而范德化力、表面张力起主要作用,表面张力包括静电力和粘滞力,这些力的力学性质是不清楚的,所以控制非常困难。另外由于器件的微小,目视也很困难,一般是在显微镜下进行装配和操作。由于器件和生物组织的微小,装配和操作时不能对操作者形成力的反馈,而这些微小器件又容易破碎,所以微装配与微操作和传统宏装配相比要困难得多,牵涉的技术手段、理论基础也较复杂。

1.1 微装配与微操作的发展背景

传统的微机电系统(Micro-Electro-Mechanical-Systems, MEMS)是借助于集成电路工艺,利用刻蚀技术制造微小尺寸的机械器件,如梳状结构、微悬臂梁、微质量块等。这些器件制造在硅基材料上,很容易和控制电路集成在一起,封装后形成微机电系统。利用该工艺的另一个好处是可以对产品进行批量生产,从而降低成本。当然,和它的优点一样,它也有很大的缺点。由于受到集成电路工艺的限制,生产出的机械器件纵向深度小,一般称为二维器件或二维半器件,同时加工的材料单一,只能对硅材料进行加工,而硅的力学性质有很大的缺陷。另一个方面是传统的微机电系统封装非常困难,要针对不同的对象进行不同的封装,很难形成标准的工业封装,从而提高了微机电系统的成本。图1-1是利用集成电路工艺生产的微器件。从图中可看出它们的纵向深度非常小,强度低,很难得到实际应用。图1-2是福特公司生产的压力传感器,图中左边是控制和补偿电路,右边是质量块和电容传感器。图1-3是微陀螺加速度传感器的梳状结构。

为了克服传统 MEMS 制造过程中的浅纵向深度问题,德国科学家发明了 LIGA(德语中的 X 射线光刻——X-ray Lithographie,电化学沉积——Galvanoformung,铸造——Abformtechnik 等字母的缩写)技术。它是利用 X 射线进行光刻制造出掩膜,然后利用微铸造技术生产出制造微器件的铸模,利用该铸模可以批量生产出微器件。这种工艺可以制造出真正的三维微器件,同时它的制造材料也不局限于硅。它的缺点是成本太高;生产出的器件需要装配后才能形成微机电系统;不容易将集成电路和微器件集成在一起。为了降低成本,IBM 公司又发明了准 LIGA 技术,它利用紫外光进行光刻制造掩膜。图1-4为利用 LIGA 技术生产的轮系。

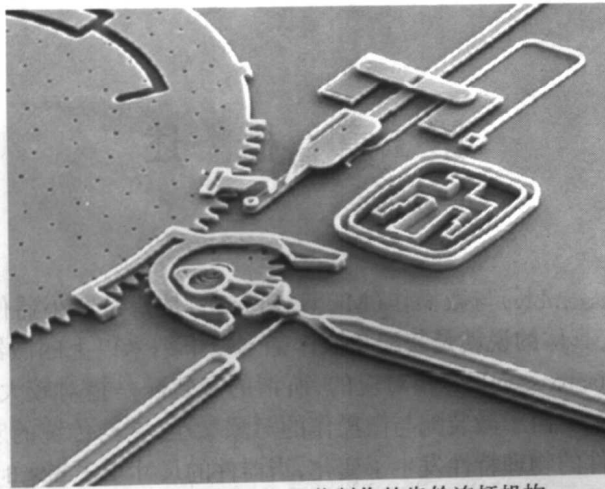


图 1-1 由 MEMS 工艺制作的齿轮连杆机构

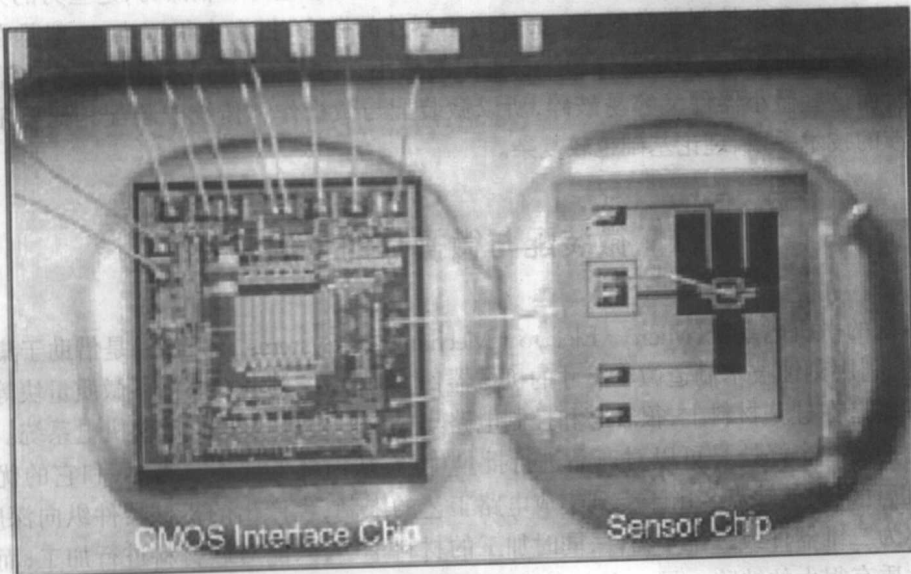


图 1-2 福特公司压力传感器

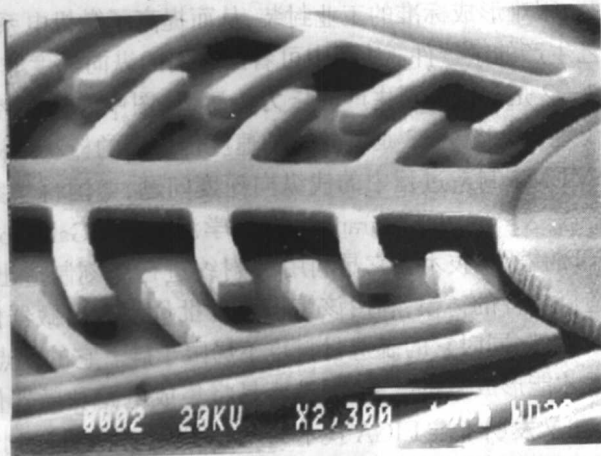


图 1-3 微陀螺加速度传感器的梳状结构

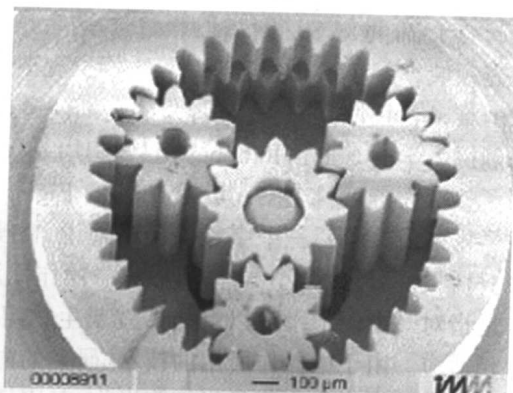


图 1-4 利用 LIGA 技术生产的轮系

由于传统的微机电系统加工方法只能制造出二维或二维半的机械器件,同时存在封装困难,所以利用该方法生产的商品化产品只有传感器系列。未来的微机电系统应用非常广泛,包括生物医学、环境监测、计算机通信、工业自动化、国防工业等领域,产品包括生物医学用检测设备、微创手术设备、便携式环境检测设备、光通信设备、微继电器、微阀、微电机、喷墨打印头、微卫星用设备等,这些微机电系统使用目的不同,采用的材料各异,传统的微机械加工方法是不能制造出这些产品的,一般采用 LIGA 技术或超精密加工技术,超精密加工技术包括微电火花加工技术、微激光加工技术、微超声波加工技术、微切削加工技术、微铸造加工技术、电化学加工技术、微磨削和微冲压加工技术等。利用 LIGA 技术和超精密加工技术加工出的微机械器件必须进行装配才能形成微机电系统,即使利用传统集成电路生产的微机械器件,要组成复杂的系统也必须进行微装配,图 1-5 是利用微装配技术,将传统加工方法生产的微机械器件装配在一起,形成复杂微机械系统。所以微加工和微装配技术在未来复杂微机电系统的生产中起着举足轻重的作用。

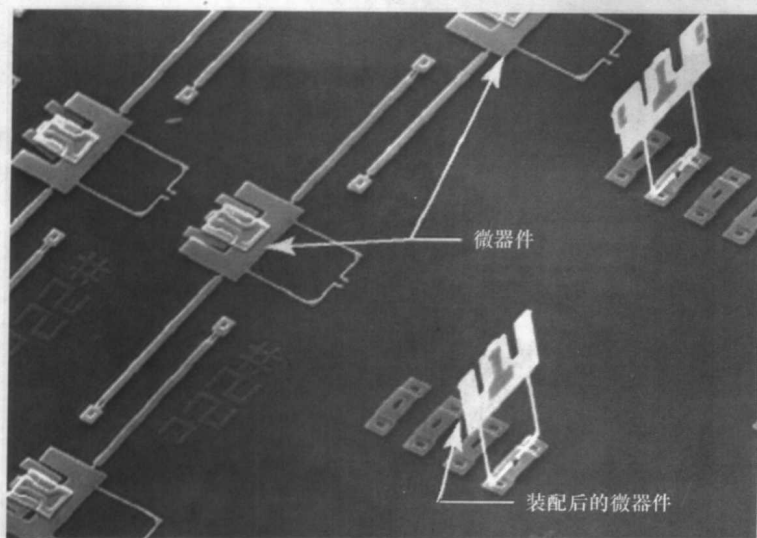


图 1-5 硅微器件的装配

微装配与微操作都起源于 20 世纪 80 年代,但开始时,两者是分属于两个不同的研究领域。在微机电系统研究领域,当 LIGA 技术出现后,人们发现要将利用 LIGA 工艺制造的微器件装配起来非常困难,从而引发了微装配研究的热潮。微操作的发展主要受到了两个事件的影响:其一,剑桥大学的 Colin Humpheys 教授利用光栅扫描电子束,在大头针头部大小的面积上刻写了整部大英百科全书;其二,IBM 的 Eigler 和 Schweizer 利用原子力显微镜,将 35 个氦原子排列成“IBM”三个字母。严格地说,微操作是对分子或原子进行重新排列,构成需要的材料从而形成微小器件,所以将微操作称为纳米操作或分子操作更适合。本书的微操作是指对毫米以下微米以上的器件或生物组织进行的操作,以便与微装配的操作对象尺寸相适应。由于微操作所用的技术、研究的内容与微装配一致,所以将两者放在一起讨论。本书中的微操作主要是指细胞操作、基因切割、生物组织参数测试等,图 1-6 为细胞操作系统,图 1-7 是利用微操作系统对生物组织参数进行测定,主要是对血管压力、生物组织弹性进行测定。

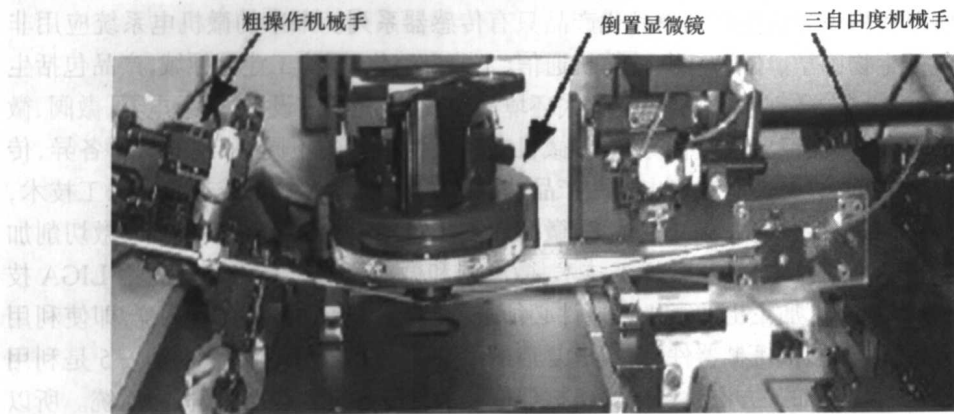


图 1-6 细胞操作系统

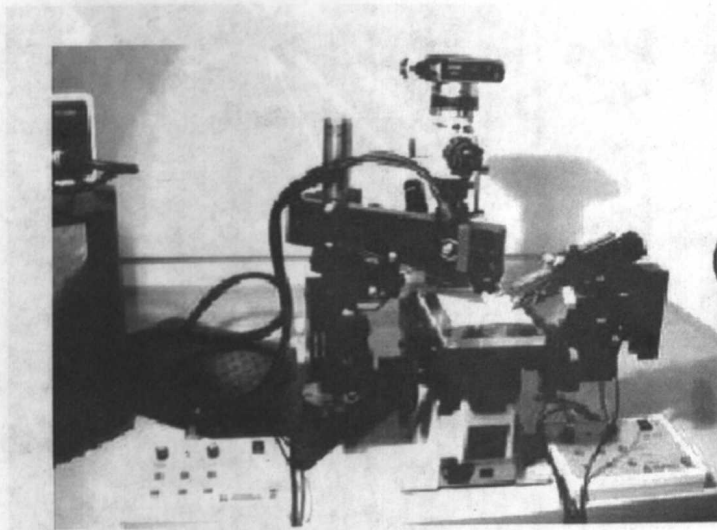


图 1-7 医疗工程用微操作系统

1.2 微器件的物理学特点与特性分析

微装配与微操作和传统的装配(一般称为“宏”装配)有很大的不同,主要是微装配与微操作的对象尺寸是微米以下级的。从图 1-8 可以看出,当球半径小于 1mm 时,表面张力总是大于重力,当球半径小于 0.1mm 时,范德华力总是大于重力,而当球的半径小于 0.01mm 时,静电力要大于重力,而在这三种力中,表面张力的影响最大。表面张力主要受环境湿度和互相接触物体的表面材料影响。干燥或真空的环境、不吸水的表面涂层都可减小表面张力。静电力主要产生于摩擦和物体的碰撞,带不同电荷的物体将产生静电力。表面张力和静电力很难建立起力学模型,所以在微器件的装配与操作中一般使用闭环控制。同时,由于重力因数下降,当操作手爪靠近微器件时,微器件会突然吸附在手爪上,见图 1-9 所示。同样,也由于重力的减小,而当释放微器件时,它又会粘连在手爪上,见图 1-9 所示。同样,也由于重力的减小,使得器件装配时几乎感觉不到力的反馈,而微小的器件又容易破碎,所以在装配时必须使用微力传感器进行力的反馈。要检测到微小力的反馈,力传感器的设计面临挑战。另外,由于器件的尺寸为微米以下量级,它的定位精度要求达到几百纳米,普通的机械手是无法达到这样精度的,必须设计高精度的微装配与微操作手爪。

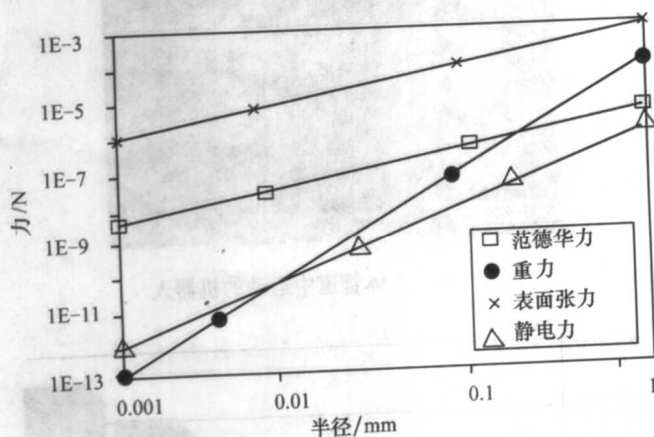


图 1-8 微器件重力与其他各种力的比较

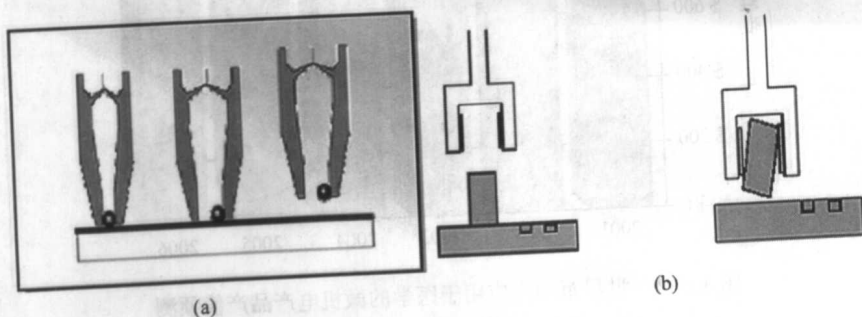


图 1-9 微器件的释放和抓取

(a) 释放; (b) 抓取。

1.3 微装配与微操作的经济效益及存在的问题

随着人类资源的匮乏、对环境保护的需要以及追求更好的医疗和保健,人们对微机电产品的需求种类和数量不断增加,生产出结构复杂、智能化程度高、品种繁多的微机电产品尤为迫切。近几年来,超精度加工技术和特种加工技术取得了长足发展,微米量级的微器件已可以加工出来,所以微装配技术发展水平将直接影响到微机电系统未来的发展。

制造业的发展趋势是超高精度、小型化、智能化和集成化,它的一个发展趋势是制造产品向生物、医学领域辐射,生产出生物、医学领域中使用的自动设备或辅助设备,图 1-10 是在人体管道中运动的微机器人,它可以进行肠道检测、清除血管中脂肪等工作。这样复杂的微产品不仅需要传统的 MEMS 加工技术,也需要微加工技术和微装配、微操作技术。图 1-11 是世界范围内 MEMS 产品应用于医学工程的产值。图 1-12 为各国在微创手术设备中所占份额。

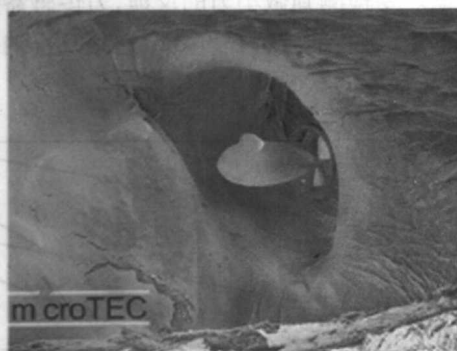


图 1-10 人体管道中运动的机器人

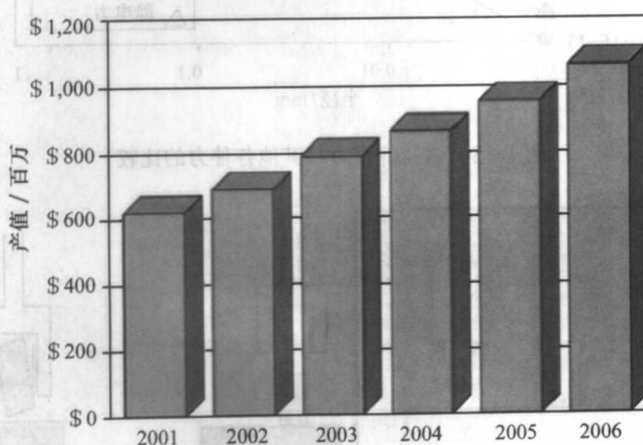


图 1-11 世界范围内应用于医学的微机电产品产值预测

可以看出,微机电系统有着极好的市场前景和重大的经济意义。“欧洲多功能微系统卓越网络”(NEXUS)组织对 1996 年—2002 年之间的微机电系统市场作了详细的调查和

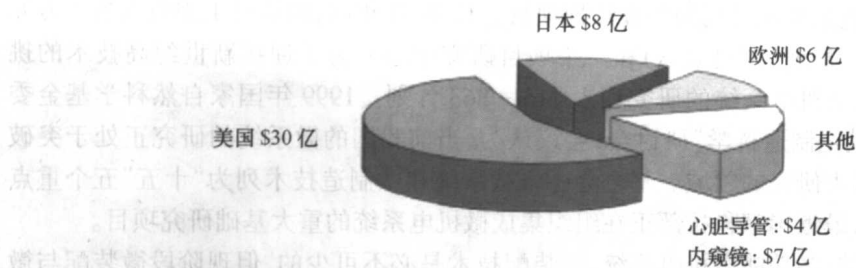


图 1-12 世界范围内微创外科手术设备预测

预测,并发表了一份研究报告,该报告指出微机电系统产值将从 1996 年的 144 亿美元上升到 2002 年的 380 亿美元。年均增长 18%,6 个主要的微机电系统应用领域是 IT 外设、医疗生物、工业及自动化、通信、汽车、环境监测。这 6 个领域 2002 年的市场预测如图 1-13 所示。

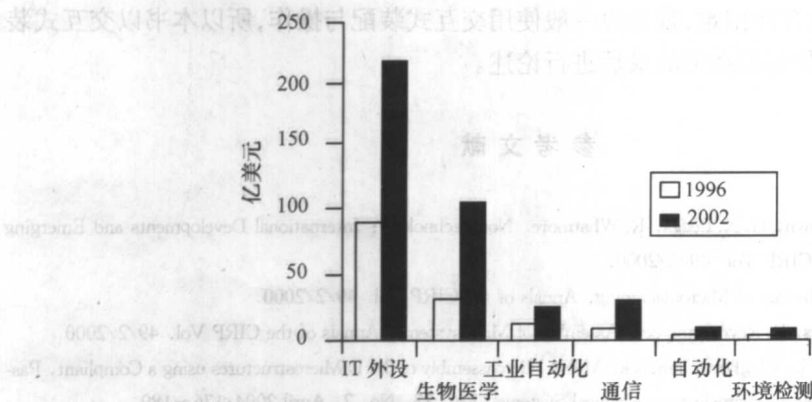


图 1-13 微机电系统市场收益预测

报告预计 2002 年 7 个微机电产品的具体市场情况,①硬盘驱动头(120 亿美元);②喷墨打印头(100 亿美元);③心脏起搏器(37 亿美元);④管内诊断器(28 亿美元);⑤助听器(20 亿美元);⑥压力传感器(13 亿美元);⑦化学传感器(8 亿美元)。该报告还列举了到 2002 年可望形成市场产品的 8 种微机电系统,①药物传送系统(Drug-delivery systems);②光开关(Optical switches);③单片实验系统(Lab-on-chip systems);④磁-光头(Magneto-optical heads);⑤投射光阀(Projection light valves);⑥线圈芯片(Coil-on-chip);⑦微继电器(Micro-relays);⑧微电机(Micro-motors)。

美国国家科学基金委员会在最近的调查报告中列举了微机电系统有重大应用的 25 个领域,并把发展微机电系统技术列为该基金会重点发展的关键技术之一。为了争夺 21 世纪高技术市场,各国对微机电系统的研究都投入了大量的资金,据美国国际技术研究院的统计,美国平均每年用于微型机械的研究与开发费用为 1.2 亿美元,日本为 1.16 亿美元,西欧为 1.28 亿美元。

我国对微机电系统的研究十分重视,国家自然科学基金委员会早在 1989 年便立项进行了研究,中国科学院于 1991 年投资 90 万元确定了重点研究项目。1993 年、1994 年国

家科委又将微机电系统项目列为攀登计划项目。自1993年起,国防科工委投入数千万元建立了两个微加工基地(IC,LIGA)和一个项目研究中心。为了迎接新世纪高技术的挑战,我国已把开展微机电系统的研究列入了S-863计划。1999年国家自然科学基金委员会组织了“21世纪制造科学”研讨会,会议认为,当前我国的微系统的研究正处于突破的前夜,是亟待深入研究的领域。基金会还将微系统和微制造技术列为“十五”五个重点投资的领域之一,最近国家科技部正在组织集成微机电系统的重大基础研究项目。

要生产复杂的、多功能微机电系统,微装配技术是必不可少的,但现阶段微装配与微操作技术还存在许多问题,要形成自动化微装配还有很长的一段路要走。问题主要为:

- (1) 微器件上下料问题,由于存在力的问题,器件装配前要经过排列;
- (2) 装配子系统的定位问题;
- (3) 装配系统的传送问题;
- (4) 高精度机械手设计;
- (5) 高精度位置传感器设计。

由于自动化装配存在困难,现阶段一般使用交互式装配与操作,所以本书以交互式装配为叙述重点,自动化装配在书的最后进行论述。

参考文献

- 1 J. Corbett, P. A. McKeown, G. N. Peggs, R. Whatmore. Nonotechnology: International Developments and Emerging Products. Annals of the CIRP Vol. 49/2/2000.
- 2 T. Masuzawa. State of the Art of Micromachining. Annals of the CIRP Vol. 49/2/2000.
- 3 H. Van Brussel, J. Peirs, D. Reynaerts, ect. Assembly of Microsystems. Annals of the CIRP Vol. 49/2/2000.
- 4 Nikolai Dechev, William L. Cleghorn, James k. Mills. Microassembly of 3-D Microstructures using a Compliant, Passive Microgripper. Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 13, No. 2, April 2004:176~189.
- 5 Keith J. Rebello. Applications of MEMS in Surgery. Proceeding of the IEEE, Vol. 92, No. 1, January 2004:43~55.
- 6 Sun Yu, Bradley J. Nelson. Microrobotic Cell Injection. Proceeding of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation Seoul, Korea, May 21-26, 2001:620~625.

第 2 章 微装配与微操作系统简介

微装配与微操作涵盖的技术包括显微视觉伺服、微机器人技术、微驱动、微定位、微力传感器、力反馈、虚拟技术、临场感技术、图像处理技术和计算机图形学技术等,是一个多学科交叉的研究领域,本章主要叙述微装配与微操作系统的组成、特点。

2.1 微装配与微操作系统组成

微装配与微操作系统基本组成包括显微镜、工业 CCD、微机械手、微定位运动平台和控制用计算机等,这种系统采用交互操作形式,只有视觉反馈而没有力的反馈,系统只能进行简单的器件取放,不能进行精确的器件装配。图 2-1 所示的就是这样的系统,从图中可以看出,系统的 CCD 为 Sony 公司的 XC-75,它的显微镜为日本 Mitutoyo 公司的 FS70 生物显微镜,系统有两个机械手,分别由电机驱动,它的定位平台为一集成电路检测平台。平台和机械手的控制由 PMAC-PC(Programmable Multi Axis Controller)伺服控制卡控制,该卡可同时控制 8 个轴的运动,PMAC 使用 Motorola DSP 56001 作为内部 CPU,个人计算机可以通过 ISA 总线或串行口与之通信。CCD 的图像捕捉卡使用 HET-VIO,它能够将图像转化为所有的标准格式,图像处理部分由 HEPC2-M 完成,该处理卡

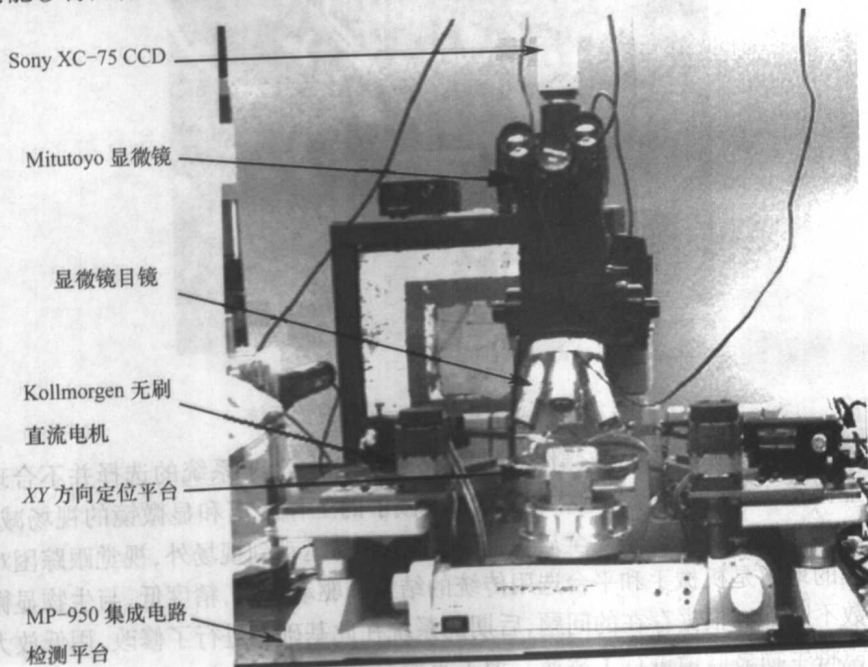


图 2-1 伊利诺斯大学微装配平台

被连接在个人计算机的 ISA 总线上。图 2-2 给出了平台的控制原理图,显微镜上的 CCD 摄像机得到特征点的数字图像,该图像被传送给 HETVIO 显示,然后数据被传送给 HEPC2-M 进行图像处理,处理的结果通过 ISA 总线送入个人计算机,通过计算机的规划计算,由个人计算机向 PMAC-PC 发出伺服控制命令,PMAC-PC 输出模拟电压,通过 D/A 转换送入目标模块,该模拟电压经过伺服放大器(S/O-4004)放大后驱动伺服电机运动,从而实现特征点的跟踪。霍尔传感器和编码器的信号通过 A/D 转换被传入 PMAC-PC 的目标模块,实现位置的闭环控制。

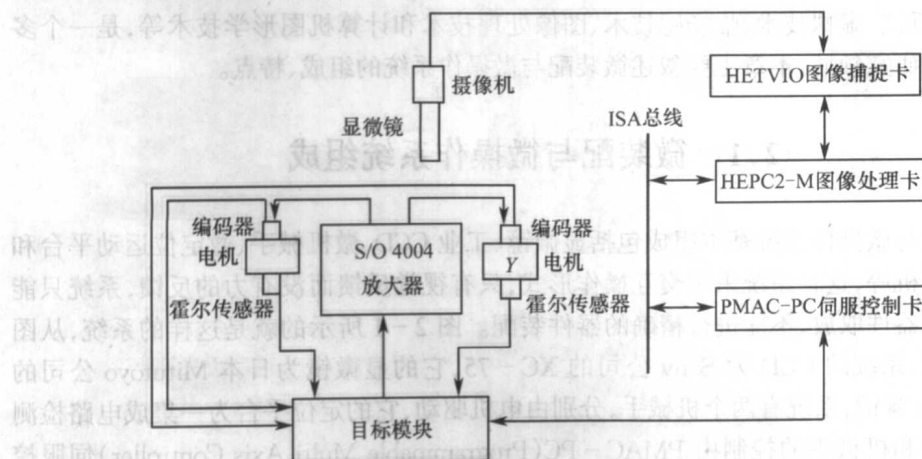


图 2-2 伊利诺斯大学微装配平台控制结构

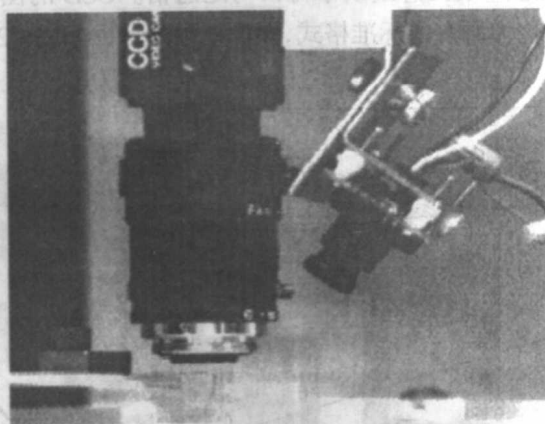


图 2-3 改进后的全局—局部视觉系统

该系统主要用于微装配与微操作的早期视觉跟踪研究,子系统的选择并不合理。如选择生物显微镜,虽然能够提高放大倍数,但机械手的工作距离和显微镜的视场减小,接近于二维操作;其次,操作时缺乏全局观,机械手很容易运动到视场外,视觉跟踪困难。另一个不合理的地方是机械手和平台选用传统的结构和驱动方式,精度低,与生物显微镜的高放大倍数不匹配。根据存在的问题,后期的系统在此基础上进行了修改,用低放大倍数的显微物镜将生物显微镜进行了替换。为了克服分辨率低的缺点,系统中增加了一个高放大倍数显微物镜,从而形成了全局—局部视觉系统。在视觉跟踪时采用低放大倍数,大