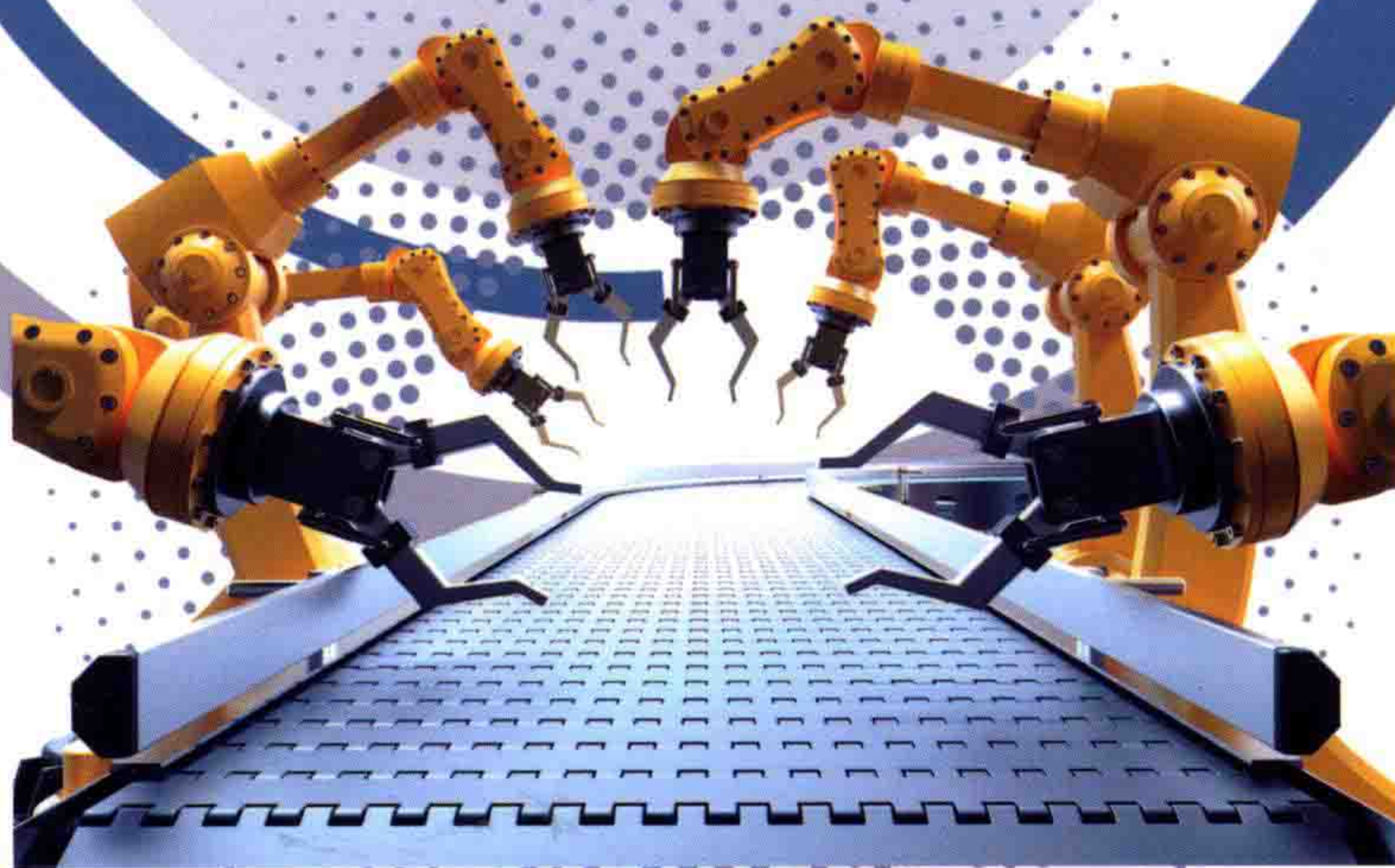


国家高技术研究发展计划项目

国家自然科学基金项目

自主研抛 机器人技术

王文忠 著



THE NEW ROBOT TECHNOLOGY FOR
AUTONOMOUS GRINDING



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

自主研抛机器人技术

The New Robot Technology for Autonomous Grinding

王文忠 著



机械工业出版社

本书主要介绍自主研抛机器人技术的相关理论基础与前沿技术,是作者近年来在国家“863”等项目中所取得的学术研究和技術实践成果的总结。

书中基于实现用小型装备对大型自由曲面进行精整加工的目标,利用移动操作机器人具有较好的操作灵活性和工作空间大的特点,提出了一种研磨大型自由曲面自主作业机器人的机械结构,并进行了关键技术的研究。重点针对研磨大型自由曲面自主作业机器人的曲面重构与定位方法、5-TTRRT 机器人运动学动力学建模、运动规划与运动控制、主被动结合的柔顺控制方式等进行了深入论述。力求设计理念符合国内外先进技术的发展要求,设计内容与国内外最新研究成果同步。

本书可供机器人研究及自动化方向的科研人员及工程技术人员使用,也可作为机械设计及其自动化、机械设计及理论、控制理论与控制工程、机械电子工程等相关专业研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

自主研抛机器人技术/王文忠著. —北京:机械工业出版社, 2017.5
ISBN 978-7-111-56942-8

I. ①自… II. ①王… III. ①专用机器人—研究 IV. ①TP242.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 127922 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:孔 劲 责任编辑:孔 劲

责任校对:樊钟英 封面设计:张 静

责任印制:李 昂

三河市国英印务有限公司印刷

2017 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 7.25 印张 · 2 插页 · 119 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-56942-8

定价:69.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

序

工业机器人技术应用于曲面的精整加工领域始于 20 世纪 70 年代，目前，技术较为成熟的是使用固定型串联关节型机器人，相关的研究成果已得到应用。例如，串联关节型机器人技术已经应用到自由曲面研磨或抛光加工的自动化制造领域。但是随着加工对象尺度的扩大，上述加工方法在自动研抛加工中会受到研抛设备加工范围的限制，同时还存在着加工范围与精度、刚度，运动快速性和稳定性等诸多技术相关联的难题。由于大型自由曲面精整加工技术发展落后于前期的曲面形状加工技术，因而将微小移动作业机器人技术应用于大型自由曲面精整加工，以弥补固定串联关节型机器人的不足。作为提高大型曲面制造的智能化和自动化手段，其在降低成本、提高效率方面的优势受到了产业界和学术界的高度重视。《中国制造 2025》的提出，对智能制造提出了新的要求，要求机器人能够实现智能自主作业。本书作者王文忠依托国家高技术研究发展计划（“863”计划）资助项目：“大型曲面自主研抛作业微小机器人技术”和国家自然科学基金项目：“自定位微小研抛机器人精整加工大型曲面研究”，针对制造领域中的这一重要问题展开深入而细致的研究。作为他的博士研究生指导教师之一，我很欣慰地看到了我的学生的专著能够出版，他的研究成果和观点能得以传播。

该书以采用小型装备对大型自由曲面进行精整加工为目的，利用移动作业机器人的技术特点，研发了一种可研磨大型自由曲面的自主移动作业机器人系统。该系统通过连接腿部的直角坐标平台，可进行 X 向与 Y 向运动，应用视觉技术对待加工曲面进行反求，以实现自主规划机器人的路径。书中对该系统在曲面模型重构与定位、运动学与动力学分析、运动规划与运动控制及柔顺控制等方面进行了深入的研究，最后通过机器人研磨加工试验对相关的原理与技术进行验证。本书结构清晰，逻辑严谨，观点明确，行文流畅，研究

思路与方法具有一定的创新性。

该书对于从事机器人加工应用的教学、研究人员及企业工程技术人员有启示作用，也可作为研究生的参考书。

王 主 鼎

前 言

近年来,航空航天和先进制造技术的迅速发展,对大型自由曲面的尺寸和表面质量的要求越来越高,研磨抛光光整加工也成为必不可少的加工工序。目前,国内外对大型自由曲面的研磨抛光加工仍然主要依靠手工操作完成,不仅费时费力、效率极低,而且研磨抛光加工后表面质量的均一性较差、表面形状尺寸精度也不高。自动化研抛系统的开发主要是基于数控机床或工业机器人进行的,如果使用机床进行大型自由曲面的自动化磨抛,需要机床的尺寸大于大型自由曲面尺寸,基于传统数控机床或磨床开发的研抛系统,由于其工作空间的局限,远远满足不了大型尺寸曲面研抛加工的要求,这样,大型设备的加工、装配都很困难,加工柔性不足,而且成本昂贵。20世纪80年代末以来,机器人应用的领域不断扩大,基于工业机器人的研抛技术研究逐渐得到了科研工作者的广泛关注,国内外科研院所和高校研究人员就机器人研抛技术做了大量的研究和开发工作,其工作空间的局限性同样远远满足不了大型工件曲面研抛加工的要求。针对上述问题,形成了采用小型自主移动机器人对大型自由曲面进行磨抛的崭新技术思路。利用移动作业机器人全区域覆盖特性,进行大型复杂曲面的研磨加工成为了一种新的方向并有着广泛的应用前景。

全书共分6章。第1章对移动作业机器人技术进行概述;第2章介绍了一种新型自主研磨作业机器人系统及该机器人坐标系内研磨曲面构建方法;第3章介绍了机器人研磨自由曲面的运动规划;第4章介绍了机器人研磨自由曲面的轨迹跟踪控制策略;第5章介绍了自主作业研磨机器人的柔顺控制;第6章介绍了5-TTRRT机器人研磨实验研究。

本书是在博士论文基础上,经过修改、充实完善而成,本书的选题来源于国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(编

号：2006AA04Z214)“大型曲面自主研抛作业微小机器人技术”。根据作者近年来所取得的学术研究和技术实践成果整理、撰写而成。首先特别感谢我的导师王立鼎院士和赵继教授，还要感谢张雷教授、李大奇博士、杨旭博士、徐刚硕士、李鹏硕士等同学对本书相关研究所做出的贡献。

编写本书，一方面希望推动对自主研抛机器人的进一步研究，同时也希望能够为同行提供借鉴和参考。

本书的出版得到吉林省科技发展计划重点科技攻关项目（项目编号：20140204011GX）“基于自主作业机器人的自由曲面研抛加工研究”和长春工程学院学术专著出版基金的资助，特致以衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中必然存在许多错误不当之处，在文字和结构上亦存缺憾，恳请读者批评指正！

王文忠

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 应用机器人技术精整加工大型自由曲面的背景	1
1.2 机器人精整加工自由曲面技术研究进展	2
1.3 移动作业机器人技术国内外研究现状及关键技术研究	6
1.3.1 移动作业机器人国内外研究现状	6
1.3.2 移动作业机器人关键技术研究	9
第 2 章 新型自主研磨作业机器人系统的研究	16
2.1 移动研磨作业机器人系统	16
2.1.1 自主作业研磨机器人系统技术思路	16
2.1.2 自主作业研磨机器人的结构与性能要求	17
2.2 自主作业研磨机器人机械本体的研制	17
2.2.1 移动平台的构建	17
2.2.2 操作臂的研制	18
2.2.3 研磨工具开发	20
2.3 自主作业研磨机器人控制系统	20
2.4 5-TTRRT 机器人坐标系内研磨曲面的构建方法	21
2.4.1 系统组成和工作原理	22
2.4.2 自由曲面的三维重构	23
第 3 章 机器人研磨自由曲面的运动规划	29
3.1 5-TTRRT 机器人运动学与动力学模型	30
3.1.1 5-TTRRT 机器人运动学模型	30
3.1.2 5-TTRRT 机器人动力学建模	31
3.1.3 5-TTRRT 机器人运动学动力学仿真	32
3.2 自由曲面的分片规划	34
3.2.1 自由曲面特征的基础	34
3.2.2 自由曲面分片规划的提出与分片研磨方法	36

3.2.3 自由曲面的加工路径规划	39
3.3 5-TTRRT 研磨机器人的位姿与运动规划	41
3.3.1 移动平台姿态控制策略	41
3.3.2 研磨工具位姿在机器人运动空间中的表达	42
3.3.3 自由曲面研磨精加工的行切法轨迹规划	44
3.3.4 自由曲面研磨精加工的环切法轨迹规划	45
3.3.5 行切法轨迹规划与环切法轨迹规划的比较	45
第4章 机器人研磨自由曲面的轨迹跟踪控制策略	47
4.1 滑模变结构基本理论	47
4.1.1 滑模变结构控制的基本原理	47
4.1.2 滑模变结构控制的特点	48
4.2 PD + 前馈型滑模变结构补偿控制	49
4.2.1 问题描述	49
4.2.2 PD + 前馈补偿滑模控制器设计	50
4.3 仿真研究	53
第5章 自主作业研磨机器人的柔顺控制	56
5.1 阻抗控制概述	56
5.1.1 机器人阻抗控制	56
5.1.2 阻抗控制模型	57
5.2 机器人研磨工具端与环境的等效模型	58
5.2.1 等效模型的建立	58
5.2.2 研磨机器人系统的刚度系数 K_p	59
5.3 基于位置的阻抗控制	62
5.3.1 基于位置的阻抗控制	62
5.3.2 阻抗控制中稳态力误差分析	64
5.3.3 调整阻抗参数的仿真研究	65
5.4 模糊阻抗控制	67
5.4.1 基于模糊逻辑的阻抗控制设计	68
5.4.2 常规阻抗控制与模糊阻抗控制的仿真研究	71
第6章 5-TTRRT 机器人研磨实验研究	74
6.1 研磨材料的去除模型	74
6.2 实验平台	75
6.3 机器人研磨实验	76

6.4 研磨工艺参数对研磨效果影响的正交试验·····	77
6.4.1 因素水平确定·····	77
6.4.2 各主要因素对研磨效果的影响·····	79
6.4.3 实验结果分析·····	80
附录·····	82
参考文献·····	93

第1章 绪 论

“机器人是一种自动的、位置可控的、具有自动编程能力的高度灵活的自动化机器，这种机器具备一些与人或生物相似的能力，如感知能力、规划能力、动作能力和协同能力”。到目前为止，国内外已对机器人基础理论与基础元器件进行了全面的研究。已相继研制出门类齐全的工业机器人及水下作业、军用和特种机器人，在不同的行业取得了广泛的应用。

目前，将机器人技术应用于大型模具自由曲面精整加工，提高大型曲面制造的智能化和自动化，以降低成本、提高效率，受到了产业界和学术界的高度重视，并且一致认为“模具是工业生产的基础工艺装备”^[1]。

1.1 应用机器人技术精整加工大型自由曲面的背景

进入21世纪以来，对于大型自由曲面零件的加工要求越来越高，如曲面模具、航空镜头及航空发动机叶片等。其中模具成形具有优质、高效、低成本的特点，世界模具市场需求潜力巨大，因此模具制造已成为各工业发达国家制造业中举足轻重的行业。在机械、电子、轻工、汽车、纺织、航空航天等行业得到了广泛的应用，并承担了这些工业领域中60%~90%产品零件、组件和部件的加工生产。在模具的整个制造过程中，各工序工作量所占比例依次为：设计约11%、制造约52%、型面的精整加工约占37%^[2]。模具型面的精整加工工作量大，而且是决定模具和制件质量的重要因素，对产品和模具本身寿命影响极大。据统计，模具型腔表面粗糙度改善一级，模具寿命可提高50%^[3]。因此，加速研发高精度大型模具自由曲面精整加工技术是必然的趋势。

目前，通过前期的数控加工方法可以实现大型模具自由曲面的自动化形状加工，但是为了获得预期的表面质量，加工后的表面都需再经过平滑加工（Smoothing）、研磨（Lapping、Grinding）或抛光（Polishing）等光整加工工序。当前大型自由曲面精整加工技术的发展落后于曲面形状加工技术，由于大型自由曲面精加工的工艺环节自动化程度相对较低，常常还需依靠耗费大量工时的手工操作方式来完成表面研磨（Lapping、Grinding）或抛光（Polishing）。在美国、日本和德国等发达工业国家，总工时的37%~42%被用于精密模具曲面的手工研磨或抛光加工，在我国达到了50%以上。手工研磨或抛光加工

过程中,形状精度与加工质量的一致性差,且效率低下,与降低制造成本、缩短生产周期、提高质量等要求的矛盾越来越突出,模具制造过程中的薄弱环节与发展瓶颈主要集中在对大型自由曲面的精加工阶段。目前,进口模具约占国内市场总量的20%左右,40%以上中高档模具依靠进口。因此研发具有自主知识产权的大型自由曲面精加工技术与装备的需求越发迫切,特别是针对大型、精密、复杂、长寿命的模具生产需求。

目前若干利用机器人技术的研究成果已应用到模具自由曲面研磨或抛光加工的自动化制造领域。出现了各种新颖的研磨或抛光方法、开发了各种实验装置,进行了机器人研磨运动规划、磨削干涉检验、研磨工艺与控制策略及控制算法的研究等^[4-6]。

为了实现大型自由曲面的研磨或抛光加工自动化,在对不同加工对象的待加工区域实现加工时,应用传统的数控机床或一般工业机器人技术,必须依靠大型研磨或抛光加工设备。由于机械设备结构增大到一定程度后,其精度、刚度、响应速度、稳定性和动力等方面的问题难以解决,因而大型自由曲面研磨或抛光系统的研发进展缓慢。

另外,如何使固定加工范围的加工系统适应待加工工件尺寸的变化,即如何提高加工系统的柔性,也是一种需要解决的难题。

1.2 机器人精整加工自由曲面技术研究进展

自20世纪70年代始,工业机器人技术就开始应用于曲面的精整加工,许多相关实用的研究成果已得到应用。其中技术较为成熟的关节型机器人是应用较多的一种,研磨工具被夹持在关节型机器人终端的结构方案,是机器人研磨加工系统的关键。参考文献[7-9]给出了日本几例有关机器人研磨技术的研究成果,为了实现对研磨力的反馈控制,力传感器被安装在关节型机器人的终端研磨执行器上。一个典型的以关节型机器人应用于研磨模具曲面的实例是日本东京科学大学(Tokyo University of Science)研发的机器人研磨系统^[10],图1-1是参考文献[12]提到的加工系统机械结构,机器人研磨系统采用在MOTOMAN工业机器人上加装特制的终端研磨执行机构。夹持终端球形研磨工具的细节如图1-1b所示,三维力传感器安装在工具后端的夹持装置上,可实现对加工作用力和运动方向上摩擦力的反馈。可由CAD模型提供的几何信息得到待加工部位信息,反馈的受力情况能够被综合考虑,加工接触点法向的恒力控制可通过对加工工具的力控制得到保证。

图1-2给出的关节型机器人应用实例,是西班牙马德里技术大学(Poly-

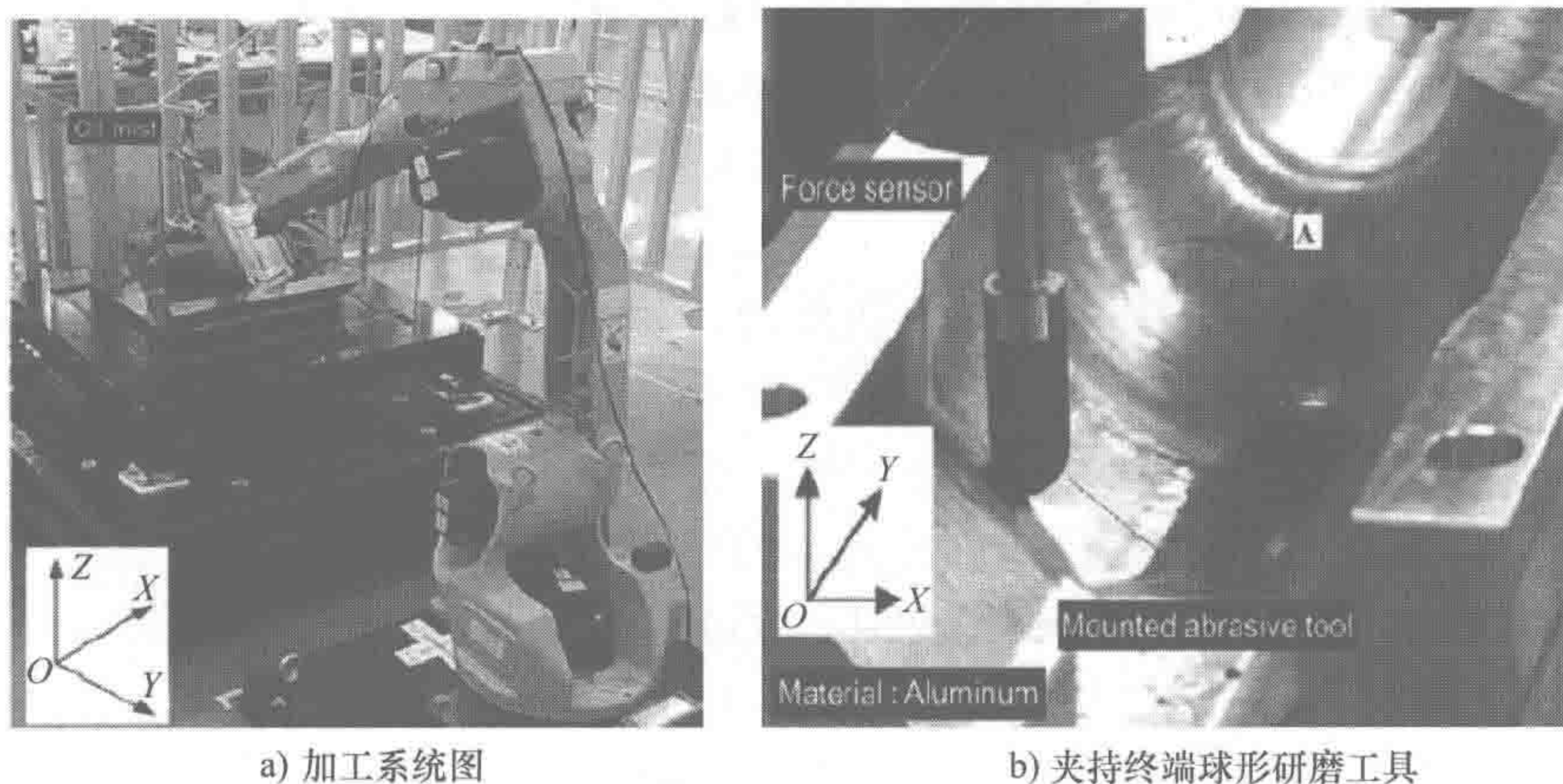


图 1-1 日本东京科学大学研制的机器人研磨系统

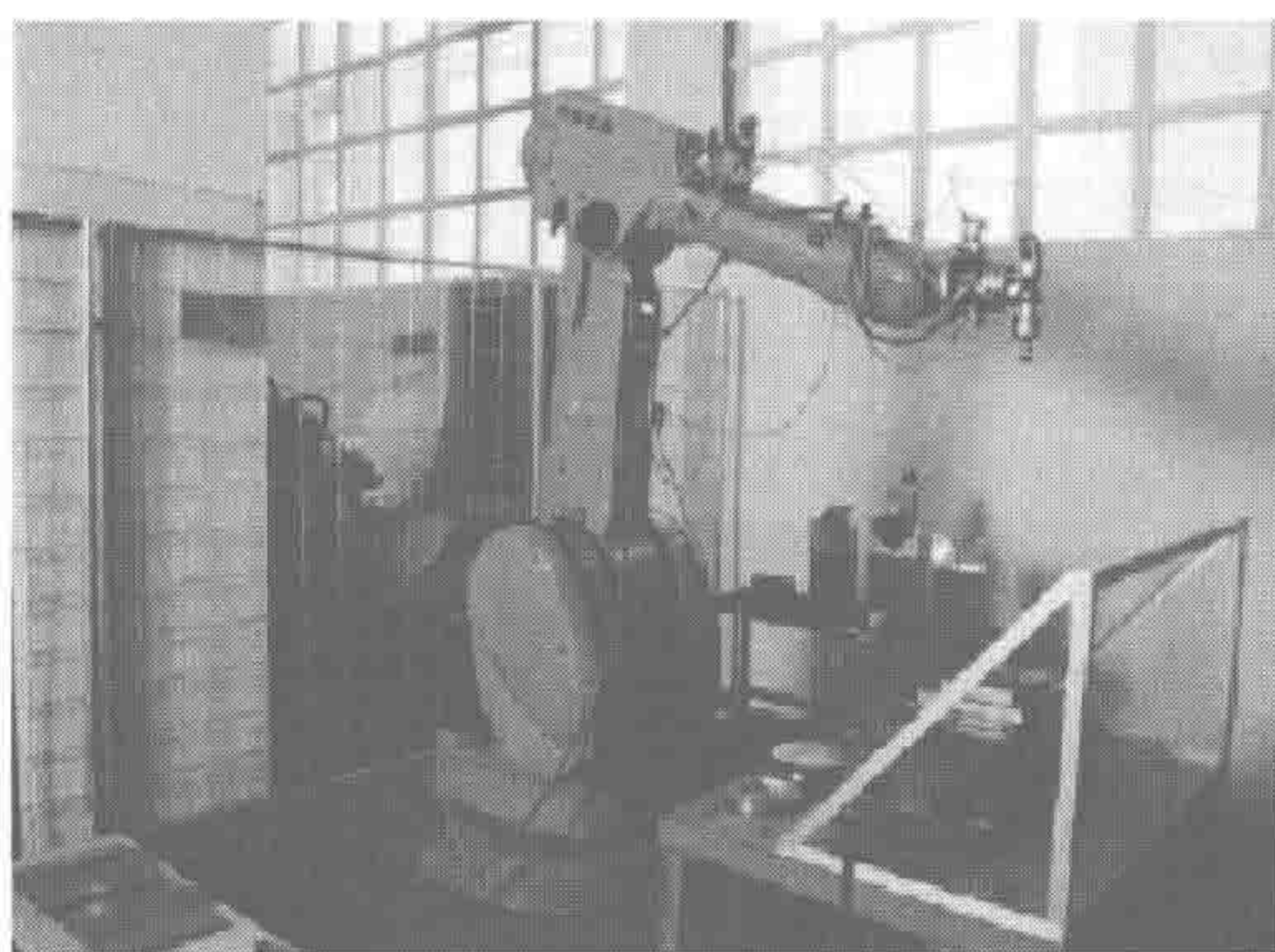


图 1-2 马德里技术大学研制的机器人研磨系统

technic University of Madrid, Spain) 研发的机器人研磨系统^[11], 在自动规划研磨工具的轨迹与控制策略方面, 综合利用的几何信息, 由被加工曲面的 CAD 数据模型与研磨工具的运动规划所提供, 实现了研磨接触力恒定的要求。

目前, 在应用不同种类的机器人实现对不同加工对象和材料的加工方面, 国内许多院校与研究所进行了机器人研磨机构、控制系统和工艺机理等方面的研究, 取得的部分技术成果已经进行产业化转化。在利用超声振动进行研磨方面, 华中科技大学基于日本的 RV-2M1 型机器人进行了相关研究^[12], 吉林大学提出了倾斜超声波研磨方法, 利用关节机器人进行了研磨金属模具的自由曲面技术研究^[13]; 中国科学院沈阳自动化所在机器人研磨有机玻璃的工艺方面, 以 SIASUN206B 机器人为实验平台进行了研究^[14]。参考文献 [15] 基于

五轴框架式加工机器人，对研磨的工艺参数和路径规划的优化进行了研究；在柔性研抛系统研究方面，参考文献 [16] 给出的机器人柔性抛光系统由一台抛光机和一台 ABB 公司的 IRB 4400 机器人组成，对于抛光过程中保持恒定压力的算法和控制方法进行了研究。在一些特殊复杂曲面的研磨加工方面，参考文献 [17] 针对飞机发动机、汽轮机叶片，研发了由六自由度 ABB 关节式串联机器人和砂带研磨机组成的机器人研磨系统，实现了复杂曲面的研磨加工。此外，在机器人曲面自动抛光系统方面，对于面向熔射快速制模的研究，参考文献 [18] 以一个六自由度的关节式 MOTOMAN UP-20 型机器人为平台进行了相关的研究，生成了机器人抛光刀具轨迹，研究了软质抛光工具的选择。

在突破传统加工观念方面，日本的一些学者设计出可以自由移动的微型机器人，提出了利用微机器人进行超精密加工的概念，通过机器人群在工件上爬行，可实现纳米级超精密加工^[19]，图 1-3 是几种微机器人用于精密加工的实例^[20-23]。

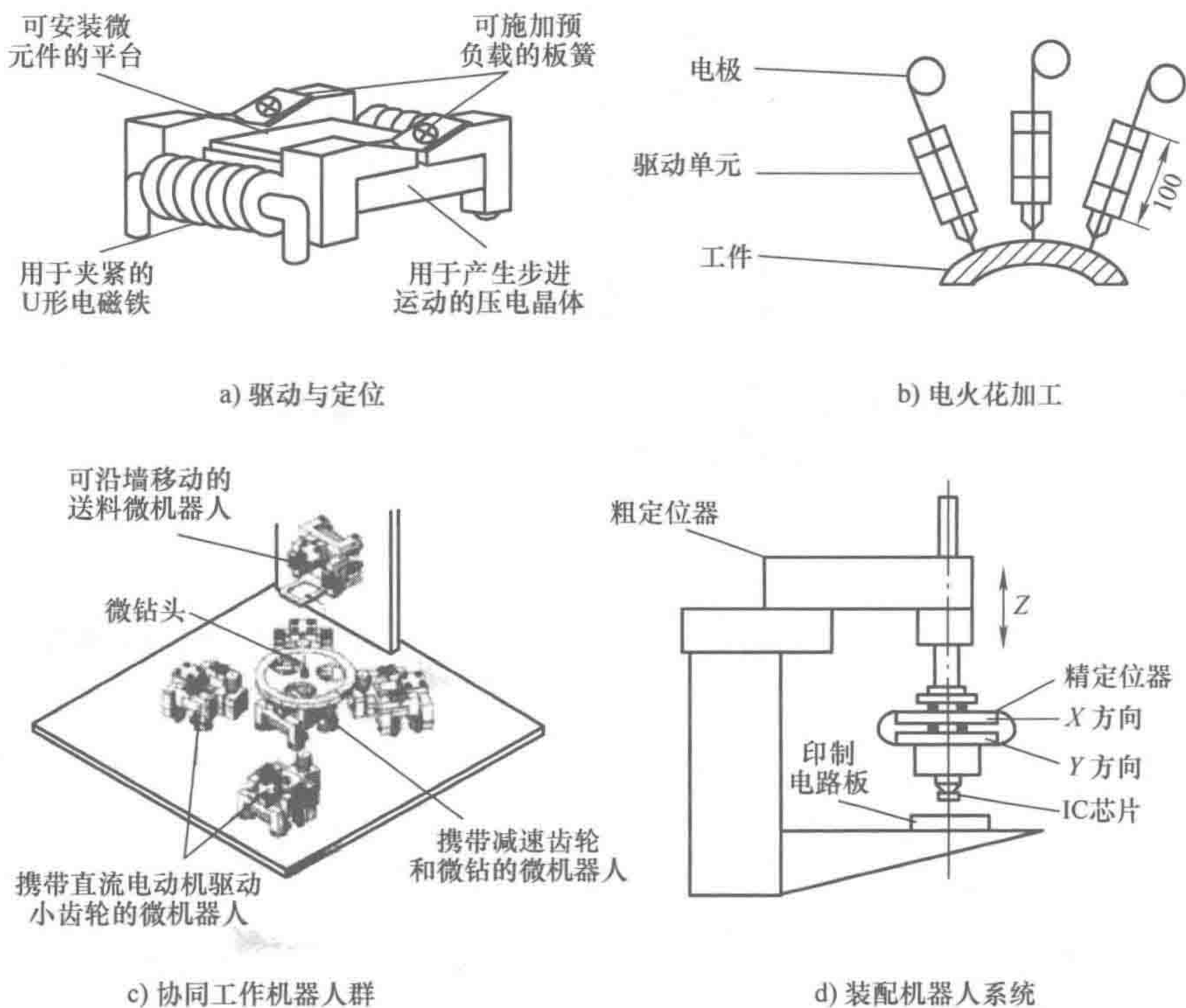


图 1-3 几种微机器人用于精密加工的实例

图 1-4 是吉林大学对大型复杂曲面自定位微小研磨移动机器人的研究成

果,目前,已开发了轮式微小移动研磨机器人^[24-26]系统。对基于轮式移动平台机器人的研磨工具与加工机理、运动学和动力学模型及相应的控制方法进行了相关研究。

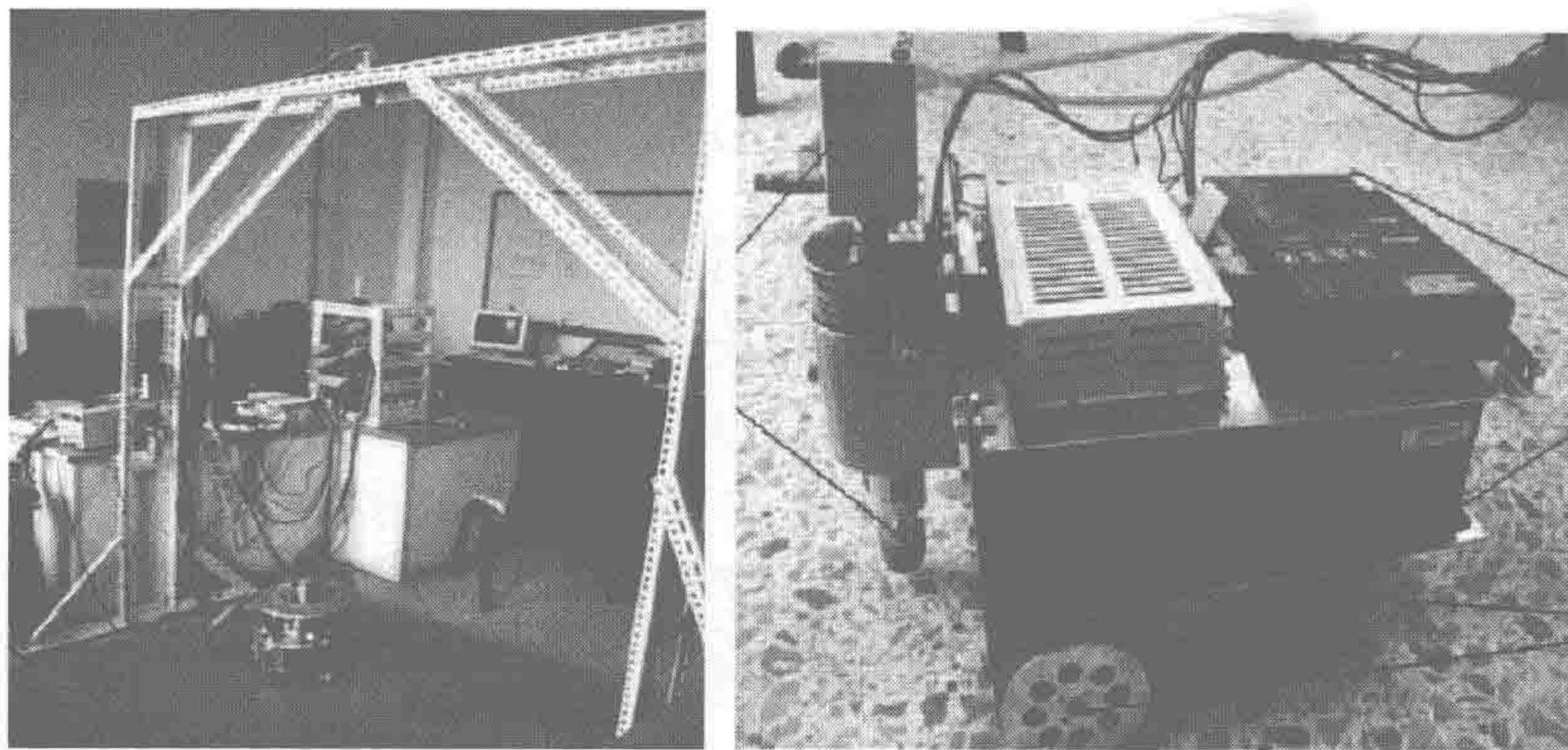


图 1-4 大型复杂曲面自定位自主作业研磨机器人

机器人构成的研磨加工系统与数控机床相比,具有较好的加工柔性较高的复杂曲面适应性。此外,该类系统在加工过程中,重点强调的是柔顺控制,较低的机械位置执行精度要求,较小的精整加工作用力要求,适合机器人刚性弱、运动精度低的特点,因此在精整加工方面具有很好的应用前景^[27]。

机器人的机械机构、研磨执行机构、控制系统和气动、液压系统构成了目前研发的机器人研磨加工系统的主体,此外,还包括控制研磨作用力的多维力传感技术、保证位置精度的位置反馈技术、导航定位的视觉传感器技术、CAD/CAM、运动规划和曲面几何模型重构技术。针对采用机器人实施研磨加工的研究主要从以下几个方面展开:

1) 在研磨工艺和加工机理方面,除常规的机械加工方法外,还涉及超声、机械电解复合加工等特种加工方法。

2) 针对柔顺性能要求,进行研磨终端执行装置和抛磨工具开发,如利用磁力、气压、弹簧等方法,满足研磨加工中对接触力的柔顺控制要求^[28,29]。

3) 根据已知的被加工工件的 CAD 模型或对于模型未知的需要通过反求重构得到的工件几何模型,根据不同的研磨执行装置和机器人结构及运动的特点,进行加工区域分划并规划出最优的工作路径,从而保证满足加工质量与加工效率的目标^[30-32]。

4) 由于机器人具有耦合性强、高度非线性的特点,结合人工智能的进展,如何实施力/位控制研究,使机器人执行研磨轨迹运动时,保持恒定研磨力,

实现力/位混合控制，还需要进一步研究。

1.3 移动作业机器人技术国内外研究现状及关键技术研究

1.3.1 移动作业机器人国内外研究现状

从20世纪60年代开始，国外就开展了关于移动机器人的研究，移动机器人涉及多个学科门类的知识。

按照移动方式分类，可以分为轮式、履带式、腿式（单腿、双腿及多腿式）和水下推进式等多种结构，其中轮式结构具有易控制、对稳定性问题影响小、单位移动距离消耗能量小的特性，且可以比其他形式的结构移动得更快。此外，轮式结构的机器人的重心一般在车轮连线在地面投影形成的多边形内，通过适当的车轮配置可以保持机器人稳定而灵活地旋转、平移，因此轮式结构在移动机器人中得到了广泛的应用^[33]。

图1-5所示3 Rover轮全方位移动操作机器人（Stanford Robot）^[34]，由斯坦福大学的Oussama K研制。

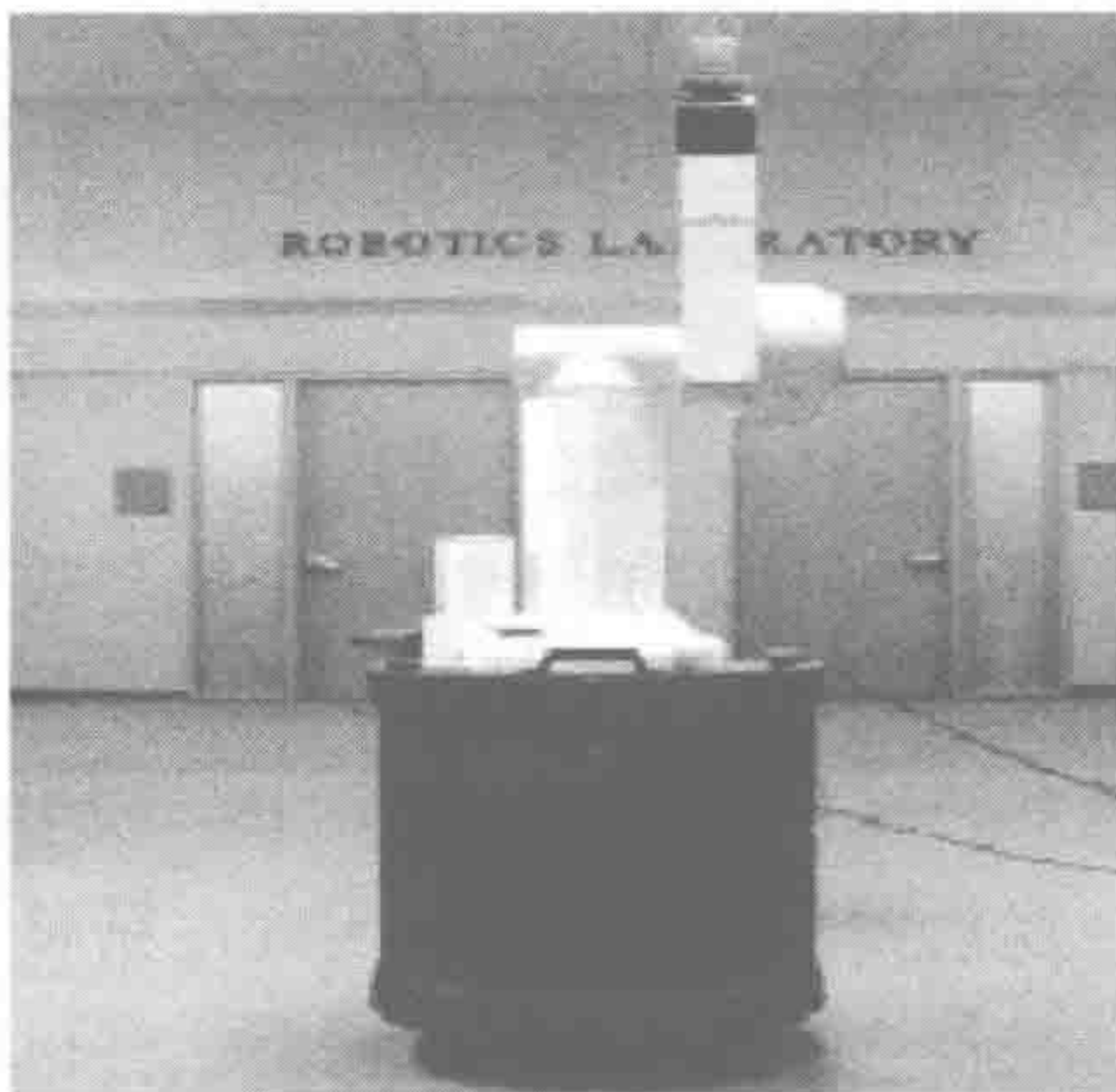


图1-5 3 Rover轮全方位移动机器人

日本东部大学的Yasuhisa H和Wang Z D研制的具有4个Mecanum轮的全方位移动操作机器人^[35]，如图1-6所示。

另外，在壁面环境下工作的爬壁机器人（Wall - Climbing Robot, WCR），WCR的运动机构主要有足式、框架式、履带式及轮式等。

图1-7所示电磁吸附足式WCR，由Guo Lin等人设计^[36]。行走机构的两只脚带有三个电磁吸盘并成交叉三角形结构，可在壁面实现交替抬起、平移和旋转运动。

Chen I. M. 等人^[37]设计了图1-8所示四只脚结构的Planar Walker，机器人的直线行走和转弯功能通过每两只脚之间的气缸伸缩运动带动实现，机器人的固定由每只脚上的吸盘保证。

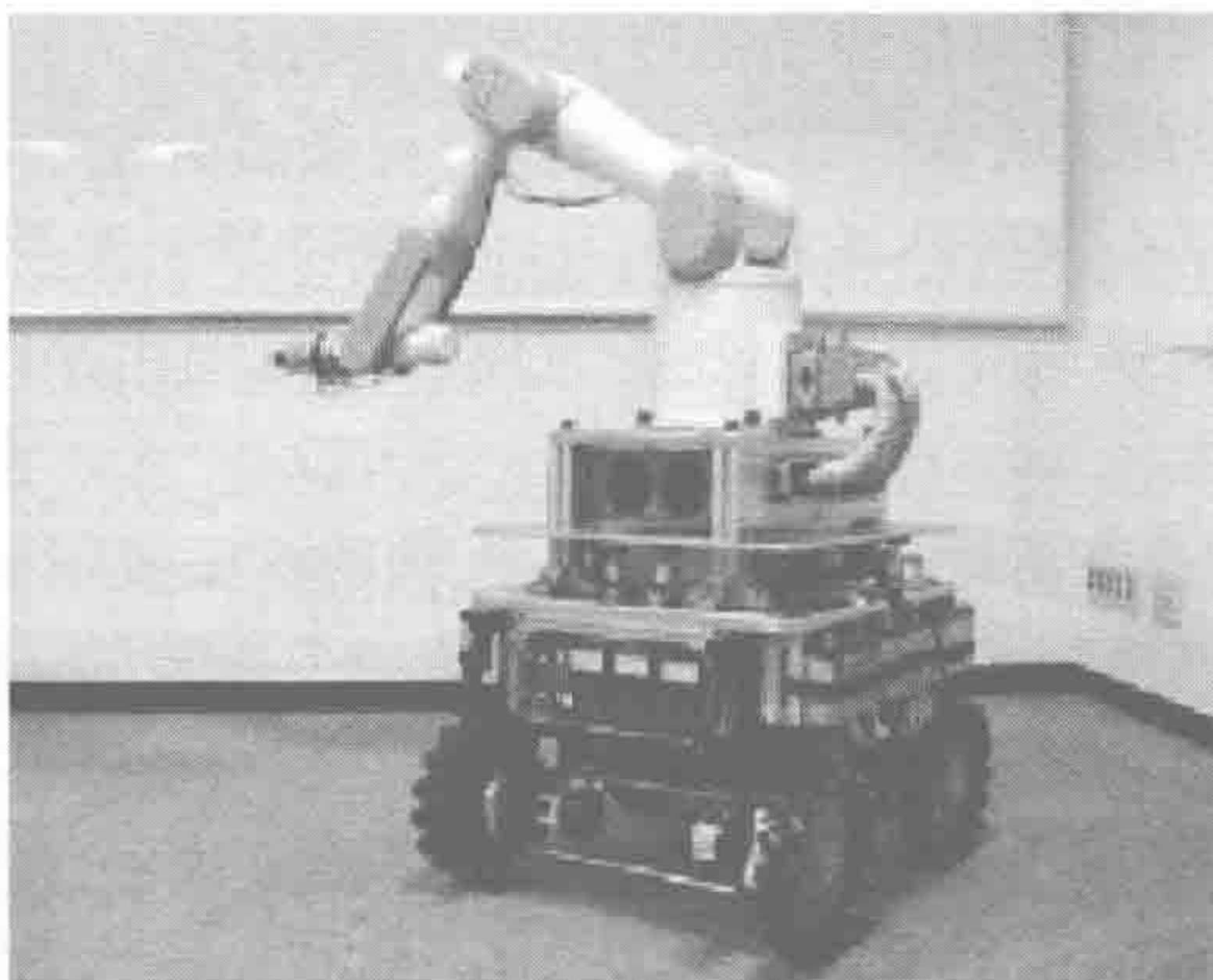


图 1-6 4 Mecanum 轮全方位移动操作机器人

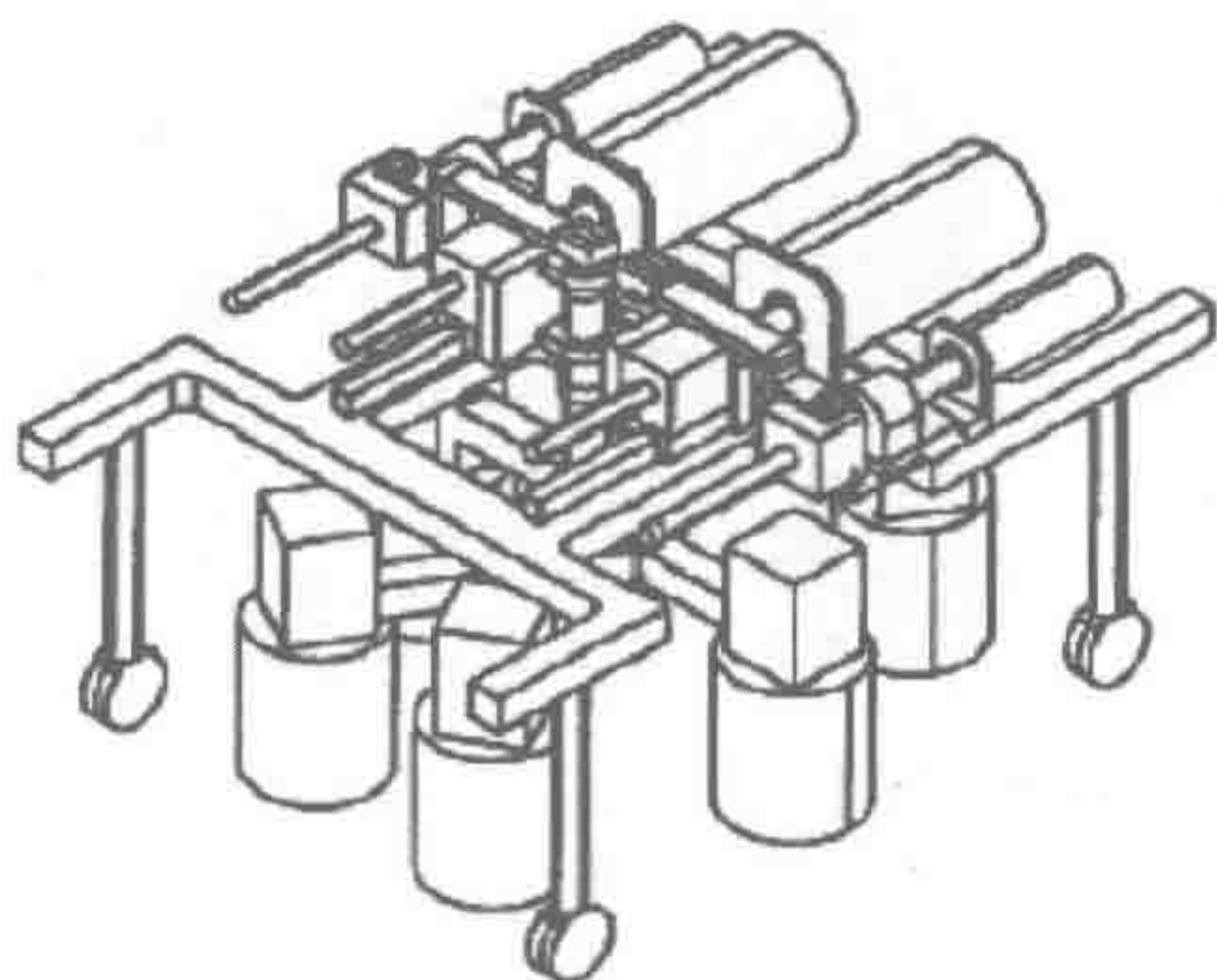


图 1-7 Guo Lin 设计的 WCR

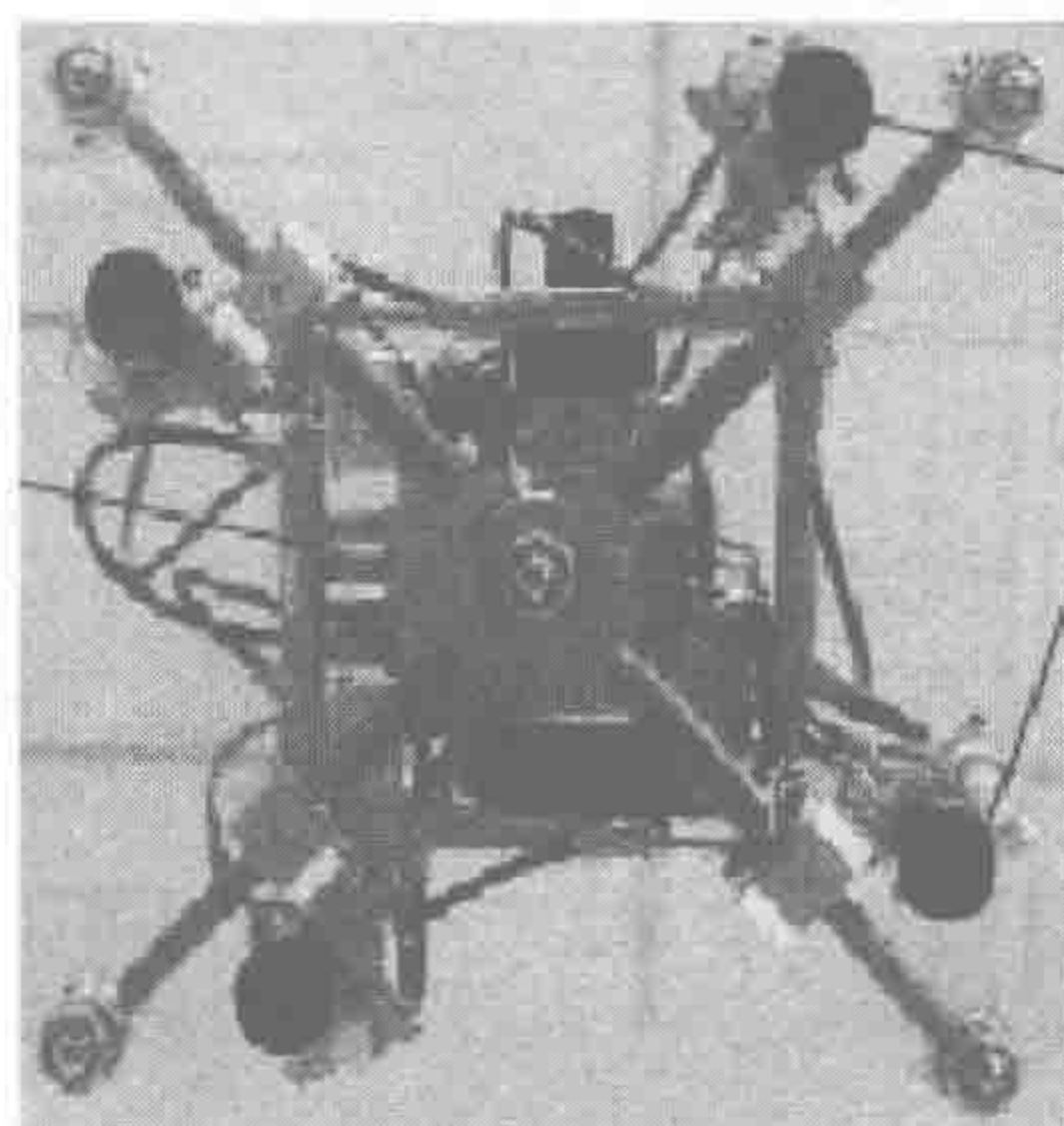


图 1-8 Planar Walker

国内在研制移动机器人方面也取得了许多成果，例如：图 1-9 中所示的具有自主知识产权的“灵蜥—B”型排爆机器人，是由中国科学院沈阳自动化研究所自行研制的^[38]。



图 1-9 中国“灵蜥—B”型排爆机器人