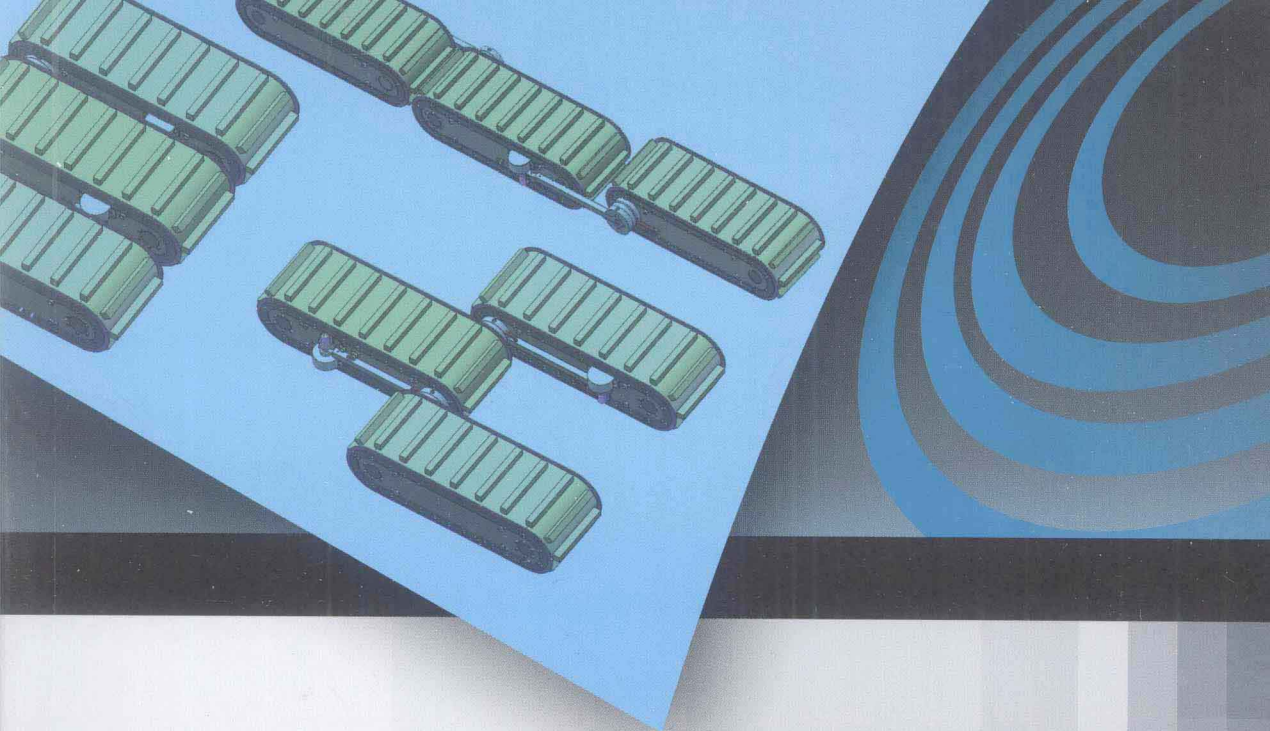




可变形模块机器人构形研究

刘金国 王越超 李斌 刘同林 著



科学出版社

可变形模块机器人构形研究

刘金国 王越超 李 斌 刘同林 著

机器人学国家重点实验室专著出版基金资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

可变形模块机器人是当前机器人领域的研究热点,它由多个模块组成,可以通过模块的不同组合和构形的变化,适应不同的任务和环境。构形研究是可变形模块机器人系统研究的核心问题,与可变形模块机器人的拓扑结构、运动学特性、动力学特性和可控性等密切相关。本书主要介绍了作者在可变形模块机器人构形研究领域十年来的部分研究成果和国内外的一些最新研究进展。全书共分为6章,分别为可变形模块机器人的研究概述、可变形机器人系统、可变形模块机器人的构形计数研究、可变形模块机器人的构形机动性研究、可变形模块机器人的构形转换研究、可变形模块机器人构形研究领域研究展望等内容。本书以实际平台、基础理论、研究方法和方法拓展应用为主线,穿插了一些构形研究的通用方法和应用示例。本书注重理论研究和实践相结合,以实际平台为依托,旨在通过方法的通用性来开拓读者的研究思路。

本书可作为可变形机器人和其他机器人领域研究人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

可变形模块机器人构形研究/刘金国等著. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-037790-6

I. 可… II. ①刘… III. 模块式机器人-研究 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 124058 号

责任编辑:张海娜 / 责任校对:胡小洁
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013年6月第一次印刷 印张:15

字数:297 000

定价:72.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



作者简介

刘金国,1978年9月生,中国科学院沈阳自动化研究所研究员、博士生导师,



机器人学国家重点实验室主任助理。近年来先后负责和参加国家自然科学基金、国家863计划、载人航天工程预研项目、中国科学院重要方向性项目等30多项课题。在国内外期刊和会议发表论文60多篇,申请专利20多项,获国家科学技术进步奖二等奖、中国科学院院长奖优秀奖、中国科学院沈阳分院优秀青年科技人才奖、辽宁省自然科学学术成果奖一等奖、中国机械工程学会优秀论文奖、无人智能系统国际会议(ISIUS 2008)最佳论文提名奖、IEEE机器人仿生学国际会议(IEEE ROBIO 2005)最佳论文奖等奖励20多项。主要研究方向包括:智能机器人系统、空间机器人与自动化装备、机器人机构学及智能控制方法等。

王越超,1960年6月生,中国科学院沈阳自动化研究所研究员、博士生导师,



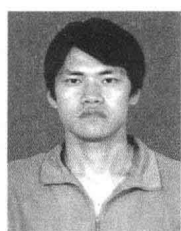
机器人学国家重点实验室主任,《机器人》杂志主编,国务院学位委员会学科评议组成员,中国自动化学会理事,中国自动化学会机器人专业委员会主任委员,辽宁省自动化学会副理事长。主持完成国家973计划、863计划、科技攻关重大专项、国家自然科学基金、中国科学院重点项目等多项课题。在机器人控制理论与方法、技术攻关、推广应用等方面取得多项成果,在国内外重要期刊和会议发表论文100余篇,获国家科学技术进步奖二等奖两项、中国科学院科技进步二等奖两项、辽宁省科技进步一等奖一项,多次获得省部级授予的荣誉称号。主要研究方向包括:多机器人系统、机器人遥操作、纳米操作机器人、危险作业机器人等。

李斌,1963年8月生,中国科学院沈阳自动化研究所研究员,国家探月工程重



大专项三期工程论证组专家。主持及参加完成国家“七五”攻关、国家“八五”攻关、国家“九五”攻关、国家863计划、国家自然科学基金、中国科学院方向性项目等多项课题,主持完成十余项点焊、弧焊、浇铸机器人应用工程项目。在国内外期刊和会议发表论文80余篇,获国家发明专利12项,获国家科学技术进步奖二等奖一项、中国科学院科技进步特等奖一项、辽宁省科技进步一等奖

一项、辽宁省自然科学学术成果一等奖一项、辽宁省科技进步三等奖一项。主要研究方向包括:仿生机器人技术与系统、可变形机器人技术与系统、机器人化救援装备、特种机械臂系统等。



刘同林,1982年1月生,博士后。2005年7月毕业于辽宁大学测控技术与仪器专业,获学士学位。2005年8月被中国科学院沈阳自动化研究所模式识别与智能系统专业录取为硕博连读研究生,2010年7月博士毕业。在中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室攻读硕士和博士学位期间,发表论文15篇,其中第一作者11篇(EI源8篇)。主要研究兴趣包括:机器人智能控制、机器人仿生学、可重构模块机器人、体系顶层设计等。

序

可变形模块机器人是一种多模块化、高冗余性、高机动性、高灵巧性的机器人系统。可变形模块机器人能够根据执行的任务和作业的环境自主改变其拓扑结构,其中许多基础理论和技术问题亟待解决,是机器人领域的一个重要研究方向,也是国内外机器人研究人员关注的研究热点之一。中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室刘金国研究员、王越超研究员、李斌研究员等所在的团队 10 年前便开始了可变形模块机器人的研究,从理论研究和应用基础研究上均取得了可喜的成绩。

在机器人机构学研究领域,对可变形模块机器人的研究已经开展了很多年。构形研究是其中最核心的问题之一,也是极其富有挑战性的问题。随着机器人模块数量的增加,可得到机器人的构形数量和构形转化关系将呈指数增加,这无疑增加了可变形模块机器人设计和控制的复杂性和难度。该书作者在构形研究方面取得了大量创新性的成果,巧妙地利用了矩阵和图论的基本原理,有效解决了可变形模块机器人构形计数和构形转换优化问题,并将该方法拓展到其他同类型的机器人平台中。

可变形模块机器人可以广泛地应用于非结构环境中的作业任务。但是,对于不同环境,可变形模块机器人需要具有良好的机动性。针对可变形模块机器人平台的机动性问题,该书作者也开展了富有特色的研究工作。通过对实际机器人平台的变形原理、转向特性、越障特性和倾翻稳定性等方面的研究,为该类型机器人实际应用奠定了坚实的基础。不久前的雅安地震,该书作者研制的可变形模块机器人在地震搜救现场投入了使用,这是我国机器人在地震灾区搜救作业的首次应用。可变形模块机器人除了可进行灾难搜救外,在环境侦察、星球探测等领域也具有广泛的应用前景。

该专著系统地介绍了作者开展的可变形模块机器人构形计数、构形机动性、构形转换等方面的研究工作。这些研究工作从理论和应用方面都非常有意义,该书作者发表了多篇学术论文并获得国内外的学术奖励。当然,机器人技术的发展是无止境的,可变形模块机器人在实际应用中还有许多问题亟待解决,希望作者继续努力,在机器人研究领域做出更大的贡献。

中国科学院院士
华中科技大学教授

熊有伦

2013 年 5 月 24 日

前 言

近年来,具有一定自主、自治或自适应能力的智能系统引起广泛的关注。self-X(如 self-organization、self-reconfigurable、self-assembly、self-adaptive 等)的概念被应用到很多领域当中,研究人员希望智能系统能像生物体一样,根据需要改变自己的形状,甚至能自己繁衍或组合成自己所需的组织和结构。可变形机器人是能够根据环境和任务而改变自身结构或者形状的机器人,通常还被冠以“可重构机器人”、“自重构机器人”、“可重组机器人”和“自重组机器人”等诸多称谓。由于可变形机器人多数由模块化结构组成,还被称为“可变形模块机器人”,但是,它们共同体现了可变形的理念。这个理念,深入探究它的内在本质,可以概述为:“拓扑变化,物质不变;以变应变,适者生存”。“拓扑变化”,指的是系统的结构、形状、体态等拓扑特征可以变化;“物质不变”,指的是组成系统的元素、单元、成分等没有质的增减,它们是一定的;“以变应变”,指的是系统的变化根据环境和任务的需要而改变;“适者生存”,这里借用了达尔文进化论中的观点,指的是机器人系统在竞争方面的挑战、生存危险、系统不断优化等情况下,通过变化或进化的形式,来提高系统的环境适应性和存活能力。

可变形模块机器人一般是由多个相同模块或不同模块组成,通过模块数量的增加以及相对位置的变化,使机器人形成新的构形以适应不同的环境,并能够执行相应的任务。可变形模块机器人具有自重构、物理可实现、分布式和自适应的特点。自重构指的是机器人可以通过重新安排连接在一起的模块的顺序和位置来实现变形;物理可实现指的是机器人能够在现实世界中实现,不只是停留在理论中;分布式指的是可变形模块机器人模块间的控制是分散的,以此来确保模块鲁棒性,快速地、并行地适应环境的变化;自适应性指的是可变形模块机器人能够自动地适应环境的变化。可变形机器人系统设计包括单模块的设计、模块间联结的设计以及整体的规划性设计等,其中模块的设计最为关键。机器人模块设计是系统研究的重要组成部分之一,它包括概念设计和平台设计两个方面。对于可变形机器人系统,构形研究是可变形机器人系统研究的核心内容。因为可变形机器人的构形反映了机器人的拓扑结构,它与机器人的可控性、运动学性能和动力学性能等密切相关。

本书主要介绍了可变形模块机器人的概念、基本原理、数学模型和应用,结合

了作者和中国科学院沈阳自动化研究所相关课题组人员设计的链式模块化变形机器人平台,介绍了相似理论和图论在构形研究中的应用,并提出了构形数量的四层结构枚举方法等。全书的内容分述如下。

第1章讲述了可变形模块机器人的源起和概念、国内外研究的现状,并介绍了可变形模块机器人研究的主要内容。对常见的几种分类形式进行了归纳,对可变形机器人系统研究中的主要内容进行了分析。

第2章讲述了可变形模块机器人的变形原理、用到的软件平台(包括MATLAB和SolidWorks等)。对链式模块化结构的特点进行了分析和归纳,在此基础上提出了一种新型可变形模块化链式结构,并对其进行了设计和初步实验。

第3章讲述了对可变形模块机器人构形数量的研究,提出了一种四层结构来枚举这些构形。主要包括基于相似理论的构形研究方法、可变形机器人的构形通用计数方法、可变形模块机器人构形设计与计数、构形计数和设计方法的应用等。

第4章对可变形模块重构机器人的构形机动性进行了研究,包括基本运动形式和动力学模型、转向特性、越障特性和倾翻稳定性等。分析了可变形机器人系统的斜坡爬行性能、沟壑爬行性能、楼梯爬行性能和倾翻稳定性能。

第5章讲述了利用图论中的基本思想和原理对机器人的构形和构形网络进行的建模,实现了对构形的路径进行计算和对构形变化进行优化和控制。

第6章介绍了可变形模块机器人还需要继续进行的研究工作,并对可变形模块机器人的发展前景做了展望。

本书的研究工作主要在国家自然科学基金(60705029、51175494)、机器人学国家重点实验室自主课题(O8A120S)、机器人学国家重点实验室专著出版基金、中国科学院院长奖获得者科研启动专项资金、辽宁省博士启动基金等基金的资助下完成。

本书所涉及的研究工作得到了中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室的长期支持,研究过程中得到了日本立命馆大学马书根教授、中国科学院沈阳自动化研究所谈大龙研究员的大力帮助;本书的研究工作曾经和许多国内外单位和组织的同行进行过交流,如上海交通大学、东北大学、北京航空航天大学、澳门大学、美国南加利福尼亚大学、德国汉堡大学、新加坡南洋理工大学、加拿大 Ryerson 大学、Modular Robot Google Group 等单位和组织的研究人员;构形研究中的计数工作参考了组合数学和图论领域中许多专家和学者的研究成果;还有研究生刘传银、刘志伟、钱朋朋、洪坤、左斌、孙澍锋、金玉章,博士后高宏伟、何旭等对本书的排版和校对做出了大量工作,在此一并表示衷心的感谢!

本书有幸得到中国科学院院士、华中科技大学熊有伦教授的支持和鼓励,并在百忙中为本书作序,在此表示衷心的感谢!

可变形模块机器人作为一种新型机器人类型,研究范畴广泛,理论研究和应用均发展迅速。限于作者水平,书中不足之处在所难免,恳请各位读者和专家的指正!

作 者

2012 年 12 月于中国科学院沈阳自动化研究所

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 可变形模块机器人的研究现状	2
1.2.1 国外的研究情况	4
1.2.2 国内的研究情况	20
1.3 可变形模块机器人的分类	33
1.3.1 基于变形机理的可变形机器人分类	34
1.3.2 基于结构特征的可变形机器人分类	36
1.4 可变形模块机器人的主要研究内容概述	37
1.4.1 可变形模块机器人系统设计	37
1.4.2 可变形模块机器人模块研究	38
1.4.3 可变形模块机器人构形研究	39
1.4.4 可变形模块机器人运动特性研究	40
1.4.5 可变形模块机器人运动规划研究	41
1.4.6 可变形模块机器人控制方法研究	42
1.5 本书主要内容	43
第 2 章 可变形模块机器人系统概述	44
2.1 引言	44
2.2 可变形模块机器人的变形原理	44
2.2.1 链式模块化结构的仿生研究和特点分析	44
2.2.2 新型链式结构的变形与重组机理	47
2.3 可变形模块机器人的设计与仿真系统	48
2.3.1 基于 SolidWorks 的设计与仿真系统	49
2.3.2 基于 MATLAB 的仿真系统	52
2.4 可变形模块机器人平台简述	54
2.4.1 原理样机基础模块设计	54

2.4.2 原理样机单模块机器人系统	56
2.4.3 原理样机双模块机器人系统	58
2.4.4 原理样机三模块机器人系统	59
2.4.5 三模块原理样机系统的改进	61
2.5 本章小结	66
第3章 可变形模块机器人的构形计数研究	67
3.1 引言	67
3.2 基于相似理论的构形研究方法概述	67
3.2.1 相似理论概述	67
3.2.2 基于相似性的构形描述	71
3.3 可变形机器人的构形通用计数方法	72
3.3.1 模块的拆分计数	72
3.3.2 模块的组合计数	77
3.3.3 树状模块规则结构的计数方法	82
3.3.4 环状模块规则结构的计数方法	85
3.4 可变形模块机器人的构形设计与计数	90
3.4.1 模块连接关系的 0-1 表达	90
3.4.2 单模块拓扑信息的构形矩阵表达	94
3.4.3 构形矩阵的有关定义	97
3.4.4 模块间邻接关系的矩阵描述	97
3.4.5 构形数量分析	103
3.4.6 构形设计示例	106
3.5 构形计数和设计方法的拓展应用	110
3.6 本章小结	111
第4章 可变形模块机器人的构形机动性研究	112
4.1 引言	112
4.2 基本运动形式和力学模型概述	113
4.3 可变形模块机器人的转向特性研究	114
4.3.1 履带模块的平地接地比压研究	114
4.3.2 地面转向阻力矩分析	118
4.3.3 滑移转向特性分析	122
4.3.4 铰接转向特性分析	128
4.3.5 转向特性实验与评价	134

4.4 可变形模块机器人的越障特性研究	142
4.4.1 斜坡爬行性能	143
4.4.2 沟壑跨越性能	145
4.4.3 楼梯爬行性能	147
4.5 可变形模块机器人的倾翻稳定性研究	158
4.5.1 倾翻稳定性的稳定锥描述	158
4.5.2 变形过程中的倾翻稳定性研究	164
4.5.3 不同构形的倾翻稳定性比较	166
4.6 本章小结	169
第5章 可变形模块机器人的构形转换研究	170
5.1 引言	170
5.2 现有构形转换方法概述	171
5.2.1 基底变形运动规划	173
5.2.2 Cube 类型机器人变形规划的扩展	174
5.2.3 闭链构形转换的规划	176
5.3 基于图论的构形网络建模	177
5.3.1 图论中的基本定义和定理	177
5.3.2 构形网络描述模型和定义	178
5.4 基于构形网络的多构形转换特性分析	179
5.4.1 构形转换路径计数	179
5.4.2 构形转换路径优化	183
5.4.3 中心构形的选择	188
5.5 构形转换网络方法的拓展应用	189
5.6 本章小结	190
第6章 可变形模块机器人研究展望	191
6.1 可变形模块机器人研究的挑战	191
6.2 从常规机电系统到分子机器人	193
6.3 self-X 系统	197
6.4 本章小结	198
参考文献	199
附录	215
附1 国内外主要研究单位目录	215
1.1 美国	215

1.2	日本	216
1.3	中国	216
1.4	其他国家	217
附 2	构形计数研究的程序与代码	218
2.1	主程序 functiongx=CONRO_Enum	218
2.2	子程序:BDDG	224
2.3	子程序:DDDg	224
2.4	子程序:ADD	225
2.5	子程序:HDD	226

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

“变化”和“变形”的概念对我们来讲,并不陌生。在古代的神话和小说中,如《西游记》中孙悟空的七十二变,“变形”给予人无限遐想和精彩;在自然界中,变形虫和变色龙向人们展示了生物界的变化之美,让人赞叹于大自然的造化;在日常生活和生产中,可变形的系统也非常常见,如儿童玩具中的积木、魔方和魔术球等,生活中常用的折叠门、伞和桌椅等,还有航天和航空中的可折叠太阳能电池板和折叠式抛物面天线等,它们通过伸缩、旋转、平移及折叠等方法,可以缩小产品的存放体积,改善产品的性能或达到其他目的;从 20 世纪 80 年代,源于美国和日本的变形玩具和系列动画——“变形金刚(Transformer)”,因其趣味性、灵巧性、知识性和启发性而家喻户晓,曾一度风靡全球,此后,变形金刚逐步走出荧屏^[1,2]。人类对可变形理念的认识和运用经历着一个不断发展、延伸和丰富的过程。近年来,可变形理念被各个领域的研究者所关注和重视,特别是在先进制造业领域和机器人领域。

可变形理念首先被广泛应用于先进制造业领域。在制造业领域,顾客对产品要求的不断提高以及受到市场全球化竞争的影响,对制造系统的要求愈加严格,要求制造系统具有较大的柔性,可重构制造系统(reconfigurable manufacturing system, RMS)在这种环境下产生并不断得到发展^[3-5]。同时,在制造业中的工业机器人领域,工业机器人的工作空间由于机械系统的结构确定,而只有一定的作业范围,这就使得机器人的使用受到了较大的限制;于是人们开始研究可重构模块化机械手来适应不同的作业和任务^[6-8]。随着机器人技术的不断发展,机器人从定点作业转向移动作业,人们越来越希望移动机器人能完成更加复杂的任务。然而,单台机器人受其自身结构和系统功能的限制,只能适用于某些明确的任务和环境固定的场合;对于一些不可预知或不断变化的作业任务,就无法选择和确定机器人系统的结构,需要由许多具有不同运动学和动力学特性的机器人来协同完成,这种做法往往耗资巨大,甚至难以实行。因此,迫切需要一种能够根据作业目的和环境要求自动改变系统形状或结构的机器人。可变形机器人(self-reconfigurable robot)的研究正是针对此类应用背景开始的。

可变形机器人是一种能根据任务需要改变自身构形的机器人,可以在动态环境中完成不可预知的作业任务。可变形机器人通常由一系列具有一定功能的模块组成,这些模块的结构可以完全相同,也可以不尽相同。模块化、系列化和标准化的结构设计和采用,将使得可变形机器人系统还具有如下优点:

(1) 系统稳定性和灵活性好。由多个模块组成的可变形机器人系统,通常是一个冗余系统,当其中的某一个模块出现故障时,系统依然还具有一定的作业能力,具有一定的容错功能;同时,只需要更换相应的模块,便可以快速、便捷地解决故障;此外,系统采用系列的模块化,在技术和使用上便于取得成熟的经验,所设计的机器人系统性能比较稳定。

(2) 研制成本低和可拓展性好。可变形机器人系统如果采用模块化设计,批量的生产使得系统成本降低;同时机器人的更新换代,可以借鉴于原有的机器人模块,只需要对原模块进行改进,便能实现系统性能的提高,系统的可拓展性好。

可变形机器人融合了最新的机电、传感器及计算机控制技术,具有良好的自组织、自适应能力,能够根据环境和任务优化自身的结构,快速、有效地完成任务。可变形机器人在军事、城市安全、航天和核工业等应用领域具有重大意义,是机器人发展的一个重要方向。

1.2 可变形模块机器人的研究现状

由于可变形机器人具有广泛的应用前景和诸多优点,对其理论研究和应用技术研究引起了全世界机器人学者的关注。近年来,在 IEEE 主办的系列会议,如 ICRA、IROS 和 ICMA 等,常常有相关的专题;同时,一些著名的机器人杂志如 *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, *Autonomous Robot* 和日本机器人学会杂志等以专刊登载这一领域的研究成果。以 IEEE 数据库为例,近年来从这个数据可以查到该领域发表的论文呈指数增长(检索式:abstract=robot and(reconfigurable or modular)),如图 1.1 所示。

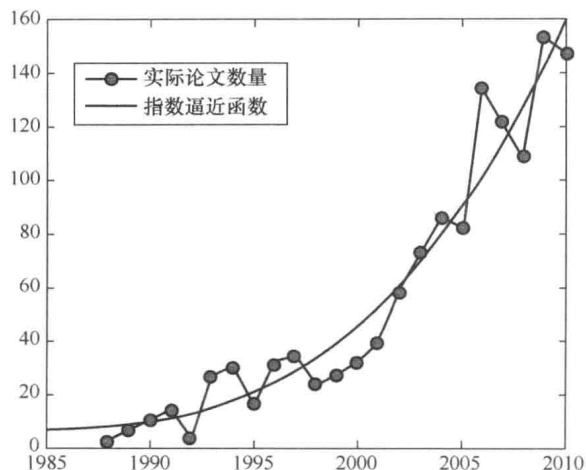


图 1.1 论文发表数量呈指数增长

由于市场全球化竞争的日趋激烈化,制造技术得到了快速的发展,信息技术也逐渐成熟,机器人的应用范围要求越来越广,而每种机器人的构形仅能适应一定的有限范围,因此机器人的柔性不能满足市场变化的要求,解决这一问题的方法就是开发可变形机器人系统。可变形机器人的研究,突破了传统机器人的研究范畴。众多的学者从不同的角度提出自己的设计思想和控制策略,使得可变形机器人的研究成为国际机器人学中最为活跃的研究领域之一。如从 Wikipedia^[9] (词条: self-reconfigurable robot) 可以获悉近年来研究的现状,主要研究平台如表 1.1 所示。

表 1.1 Wikipedia 收录的主要研究平台

系统	类型,自由度	作者	年份
CEBOT	mobile	Fukuda et al. (Tsukuba)	1988
Polypod	chain, 2 3D	Yim(Stanford)	1993
Metamorphic	lattice, 6 2D	Chirikjian(Caltech)	1993
Fracta	lattice, 3 2D	Murata(MEL)	1994
Fractal Robots	lattice, 3D	Michael(UK)	1995
Tetrobot	chain, 1 3D	Hamline et al. (RPD)	1996
3D Fracta	lattice, 6 3D	Murata et al. (MEL)	1998
Molecule	lattice, 4 3D	Kotay & Rus(Dartmouth)	1998
CONRO	chain, 2 3D	Will & Shen(USC/ISI)	1998
PolyBot	chain, 1 3D	Yim et al. (PARC)	1998
TeleCube	lattice, 6 3D	Suh et al. (PARC)	1998
Vertical	lattice, 2D	Hosakawa et al. (Riken)	1998
Crystalline	lattice, 4 2D	Vona & Rus (Dartmouth)	1999
I-Cube	lattice, 3D	Unsal(CMU)	1999
Micro Unit	lattice, 3D	Murata et al. (AIST)	1999
M-TRAN I	hybrid, 2 3D	Murata et al. (AIST)	1999
Pneumatic	lattice, 2D	Inou et al. (TiTech)	2002
Uni Rover	mobile, 2 2D	Hirose et al. (TiTech)	2002
M-TRAN II	hybrid, 2 3D	Murata et al. (AIST)	2002
Atron	lattice, 1 3D	Stoy et al. (U. S Denmark)	2003
S-bot	mobile, 3 2D	Mondada et al. (EPFL)	2003
Stochastic	lattice, 0 3D	White, Kopanski, Lipson(Cornell)	2004
Superbot	hybrid, 3 3D	Shen et al. (USC/ISI)	2004
Y1 Modules	chain, 1 3D	Gonzalez-Gomez et al. (UAM)	2004
M-TRAN III	hybrid, 2 3D	Kurokawa et al. (AIST)	2005

续表

系统	类型,自由度	作者	年份
AMOEBA-I	mobile,7 3D	Liu JG et al. (SIA)	2005
Catom	lattice,0 2D	Goldstein et al. (CMU)	2005
Stochastic-3D	lattice,0 3D	White,Zykov,Lipson(Cornell)	2005
Molecubes	chain,1 3D	Zykov,Mytilinaios,Lipson(Cornell)	2005
Prog. parts	lattice,0 2D	Klavins(U. Washington)	2005
Miche	lattice,0 3D	Rus et al. (MIT)	2006
GZ-I Modules	chain,1 3D	Zhang & Gonzalez-Gomez(U. Hamburg,UAM)	2006
Evolve	chain,2 3D	Chang Fanxi,Francis(NUS)	2008
Odin	hybrid,3 3D	Lyder et al. Modular Robotics Research Lab(USD)	2008
Roombots	hybrid,3 3D	Sproewitz,Moeckel,Ijspeert,Biorobotics Laboratory(EPFL)	2009
Moteins	chain,1 3D	Center for Bits and Atoms(MIT)	2011
ModRED	chain,4 3D	C-MANTIC Lab(UNO/UNL)	2011

表 1.1 中所收集的有关可变形机器人的平台尚不够全面。下面对国内外比较典型的可变形机器人系统进行详细介绍。

1.2.1 国外的研究情况

大约在 1950 年,von Neumann 就提出了机器自重构的概念:“通用构造器”。虽然当时的科技水平有限,但是他提出的革命性理论在元胞自动机领域产生了深远的影响;1959 年,Penrose 提出机械自重构概念,木质结构在随机晃动时可以相互连接产生各种各样的结构,并设计创造出自我复制结构,如图 1.2 所示^[10]。

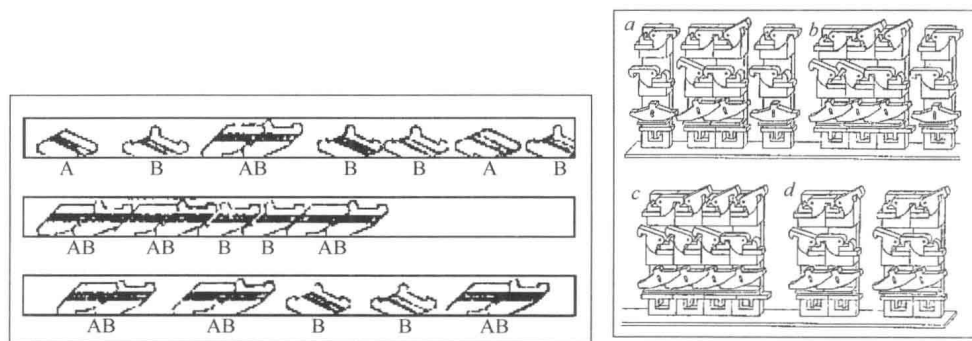


图 1.2 可复制结构

早在 20 世纪 80 年代,国外的一些研究机构就开展了对可重构机器人的研究,其中,美国卡纳基梅隆大学和日本东京科学大学等较早地开展了相关研究。