



室内移动式服务机器人 的感知、定位与控制

徐 德 邹 伟 著



科学出版社

www.sciencep.com

室内移动式服务机器人的 感知、定位与控制

徐 德 邹 伟 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以工作于室内的操作型服务机器人为背景,从控制的角度出发,由机器人系统的构成到机器人的移动感知、定位与控制,系统地阐述了服务机器人的基本原理与关键技术,并给出了服务机器人室内作业的应用示例。全书共由9章构成,分别为绪论、移动式服务机器人的结构与工作原理、运动学与动力学模型、感知与控制体系结构、人机交互、移动平台的定位与导航、路径与运动规划、控制方法与策略、典型应用示例。本书以轮式移动平台的定位与运动控制为主,同时兼顾了操作手臂的控制问题。

本书主要面向从事机器人研究和应用的科技人员,既注重反映本领域的研究前沿,又注重理论与应用的结合及可实现性。本书可作为机器人、计算机视觉等领域的科研工作者和工程技术人员的参考书,也可作为控制科学与工程、计算机等学科的研究生和高年级本科生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

室内移动式服务机器人的感知、定位与控制/徐德,邹伟著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-022144-5

I. 室… II. ①徐…②邹… III. 移动式机器人:服务用机器人-机器人控制 IV. TP242.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 076442 号

责任编辑:张海娜/责任校对:钟 洋

责任印制:刘士平/封面设计:耕者设计工作室

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>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年6月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2008年6月第一次印刷 印张:24 1/2

印数:1—3 000 字数:500 000

定价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈明辉〉)

前 言

随着计算机技术、控制理论、人工智能理论、传感器等技术的不断成熟和发展,机器人研究已经发展到一个崭新的阶段。其中,服务机器人作为一个重要分支,在国内外研究领域已经得到普遍重视,形形色色不同种类的服务机器人已经见诸报端。依据工作环境,服务机器人可分为室内和室外两大类。同室外环境相比,室内环境具有结构化程度稍高、受不确定因素影响较小等优点,因此对于室内服务机器人进行研究可在一定程度上降低由于外界干扰而带来的问题复杂度,从而可以将重点致力于机器人的自主性和智能性实现上。另外,人类大部分时间都居住或工作在室内,对于室内服务机器人进行研究可帮助人类完成很多繁琐而重复的事务,从而在一定程度上缓解人类生活的压力,提高生活质量。

目前,对于室内服务机器人的研究如火如荼,由此诞生了具有不同服务功能的多种机器人产品或样机,如能够陪人聊天的伴侣机器人、能够打扫地面的智能清理机器人、能够端茶取物的助手机器人以及能够拓展残疾人或老年人活动空间的轮椅式机器人等。在如此众多的室内服务机器人中,具有自主运动能力的移动式服务机器人可以在很大程度上拓展服务空间,提高其服务性能,而且对于提高其自身的自主决策能力、环境适应能力以及运动控制能力等诸多方面都有帮助。因此,对室内移动式服务机器人进行研究,不但能够在应用上提高人们的生活水平和生活质量,而且能够在理论上为相关领域提出新的思路和新的方法,还能够找出一些新的问题,促进这些领域的进一步发展,从而在很大程度上提高我国的自动化科研水平以及整体科研水平。

定位和控制是室内移动式服务机器人所需解决的两大首要问题,也是影响其服务性能和服务质量的两个关键因素。所谓定位是指机器人能够实时确定出自己当前的位置和姿态,只有具备了自身当前的位姿信息,机器人才能依据任务需求对自身行为进行下一步的决策和规划。机器人定位能力往往需要借助于多种传感器信息,并依据不同传感器的特点采用不同技术和策略才能得以实现。控制是机器人服务任务得以成功执行的基本保障,其概念不仅包括机器人底层的控制算法和策略,而且还容纳体现机器人智能性的上层决策和规划能力。因此,室内移动机器人的定位与控制研究,对提高机器人的自主作业能力、拓展机器人应用范围具有十分重要的意义。

本书是在作者多年从事机器人控制研究的基础上总结所取得的研究成果,并结合当前国际国内服务机器人方面的最新进展撰写完成的。全书由9章构成,分

别为绪论、移动式服务机器人的结构与工作原理、运动学与动力学模型、感知与控制体系结构、人机交互、移动平台的定位与导航、路径与运动规划、控制方法与策略、典型应用示例。本书从控制角度，以能够进行工程实现为目标，以服务机器人的定位与控制为背景，系统全面地介绍了室内移动式服务机器人的系统构成和关键技术，并给出了室内移动式服务机器人作业的典型应用示例。在反映本领域研究前沿的基础上，注重可实现性是本书的一个重要特点。

本书的部分研究工作得到了国家自然科学基金（项目编号：60672039 和 60705026）的资助，并得到了中国科学院自动化研究所与中国科学技术大学联合实验室的资助，作者在此表示诚挚的感谢。本书由徐德撰写第 3 章的 3.4 节、3.5 节、3.6 节，第 6 章，第 7 章的 7.4 节，第 8 章的 8.1 节、8.3 节、8.4 节，第 9 章；由邹伟撰写第 2 章，第 3 章的 3.1 节、3.2 节、3.3 节，第 4 章，第 5 章，第 7 章的 7.1 节、7.2 节、7.3 节，第 8 章的 8.2 节；由王华伟撰写第 1 章。本书的部分内容，采用了作者所在研究组的研究成果，特别感谢与作者共同研究并对这些成果作出贡献的研究人员鲁涛、彭一准、韩立伟、路鹏、李剑锋和周庆瑞等。

近年来，室内移动式服务机器人方面的研究发展迅速，特别是机器人自主运动控制方面的研究不断取得新的进展。作者虽然力图在本书中能够体现机器人控制的主要进展，但由于机器人控制一直处于不断发展之中，再加上作者水平所限，难以全面、完整地将当前的研究前沿和热点问题一一探讨。书中难免存在疏漏与不当之处，敬请读者批评指正。

作 者

2008 年 2 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 服务机器人的基本概念与发展历程	1
1.1.1 服务机器人的定义	1
1.1.2 服务机器人的分类	2
1.1.3 服务机器人的发展历程	2
1.2 服务机器人的研究领域	3
1.2.1 机械结构设计与驱动	3
1.2.2 感知系统与技术	7
1.2.3 控制技术	11
1.2.4 人机工程	13
1.2.5 应用研究	14
1.3 服务机器人的特点与基本结构	15
1.3.1 服务机器人的特点	15
1.3.2 服务机器人的基本机构	16
1.4 几类典型的服务机器人	17
1.4.1 清洁机器人	17
1.4.2 医用机器人	18
1.4.3 康复机器人	20
1.4.4 导游机器人	21
1.4.5 家政机器人	22
1.5 服务机器人控制的基本方法与发展趋势	22
1.5.1 服务机器人的运动控制结构	22
1.5.2 服务机器人的运动控制方法	23
1.5.3 服务机器人控制的发展趋势	27
参考文献	28
第 2 章 移动式服务机器人的结构与工作原理	31
2.1 总体结构	31
2.1.1 上位机子系统	31
2.1.2 感知子系统	35

2.1.3	控制子系统	36
2.1.4	人机交互子系统	38
2.1.5	移动平台和服务执行机构	39
2.1.6	电源子系统	40
2.2	移动机构	41
2.2.1	轮式移动机构	41
2.2.2	履带式移动机构	52
2.2.3	腿足式移动机构	54
2.3	服务执行机构——机械手	56
2.3.1	机械手定义及相关术语	57
2.3.2	典型机械手结构	58
2.3.3	移动机械手的特点	60
2.4	室内移动式服务机器人的工作原理	61
2.4.1	工作原理	61
2.4.2	工作特点	63
	本章小结	65
	参考文献	66
第3章	运动学与动力学模型	67
3.1	机械系统的运动约束	67
3.1.1	完整约束与非完整约束	67
3.1.2	广义坐标	68
3.1.3	位形空间	69
3.1.4	Pfaffian 型非完整约束系统的可控性判据	71
3.1.5	示例——单轮滚动约束	72
3.2	移动平台运动学模型	73
3.2.1	差分驱动平台	73
3.2.2	导向驱动轮式平台	75
3.2.3	全方位轮式平台	80
3.3	移动平台动力学模型	84
3.3.1	双轮差动移动平台	84
3.3.2	履带式移动平台	88
3.4	操作手臂的运动学模型	95
3.4.1	正向运动学	96
3.4.2	逆向运动学	100
3.4.3	PArm 的欠自由度逆向运动学	106

3.4.4 实验与结果	107
3.5 操作手臂的动力学模型	110
3.5.1 两连杆操作手的等效动力学模型	110
3.5.2 操作手的动力学模型	111
3.6 移动操作手臂的运动学模型	113
3.6.1 Pioneer2 的运动学模型	113
3.6.2 移动操作手臂的正向运动学	116
3.6.3 移动操作手臂的逆向运动学	117
3.6.4 仿真与结果	119
本章小结	123
参考文献	123
第4章 感知与控制体系结构	125
4.1 内部传感器	125
4.1.1 旋转编码器	125
4.1.2 陀螺仪	130
4.1.3 地磁传感器——磁罗盘	136
4.1.4 GPS 系统	141
4.2 外部非视觉传感器	143
4.2.1 接触觉传感器	143
4.2.2 压觉传感器	143
4.2.3 滑觉传感器	144
4.2.4 力觉传感器	145
4.2.5 开关式接近觉传感器	149
4.2.6 测距传感器	149
4.3 机器人视觉	155
4.3.1 机器人视觉系统组成	156
4.3.2 机器人视觉系统分类	158
4.3.3 成像模型	162
4.3.4 视觉测距	168
4.3.5 视觉特征	171
4.3.6 视觉系统信息处理单元	177
4.4 控制体系结构	179
4.4.1 分层式体系结构	179
4.4.2 包容式体系结构	181
4.4.3 混合式体系结构	182

4.4.4 运动控制模式	184
本章小结	186
参考文献	186
第5章 人机交互	190
5.1 概述	190
5.2 遥操作控制	192
5.2.1 遥操作体系结构	193
5.2.2 人机交互机制	195
5.2.3 网络通信	199
5.2.4 机器人控制实现	200
5.3 语音交互	203
5.3.1 语音识别	203
5.3.2 语音合成	209
5.4 手姿识别与控制	210
5.4.1 概述	210
5.4.2 数据手套 CAS-Glove	211
5.4.3 基于模糊推理网络的手姿识别	215
5.4.4 手姿控制实现	221
5.5 手势识别	223
5.5.1 人手三维跟踪	223
5.5.2 基于 FSM 的手势识别	230
本章小结	235
参考文献	235
第6章 移动平台的定位与导航	237
6.1 基于里程计的定位	237
6.1.1 基于速度的定位	237
6.1.2 基于运动轨迹的定位	238
6.1.3 实验与仿真结果	240
6.2 基于惯性传感器的定位	243
6.2.1 基于惯性传感器的定位原理	243
6.2.2 仿真与结果	244
6.3 视觉定位	245
6.3.1 摄像机模型	245
6.3.2 全局视觉定位	246
6.3.3 立体视觉定位	247

6.3.4 基于 PnP 的视觉定位	249
6.3.5 基于天花板的视觉推算定位	251
6.3.6 实验与结果	253
6.4 超声定位	256
6.4.1 基于天花板超声网络的移动机器人全局定位	256
6.4.2 基于超声灯塔的移动机器人全局定位	257
6.4.3 基于车载超声发射和接收器的定位	260
6.5 地图匹配定位	262
6.5.1 地图构建	262
6.5.2 基于栅格地图的蒙特卡罗定位	263
6.5.3 基于特征地图的线段匹配定位	265
6.6 基于多种传感信息的定位	266
6.6.1 定位结果校正	266
6.6.2 混合定位	266
6.6.3 信息融合定位	269
6.6.4 仿真与结果	271
6.7 路标与灯塔导航	279
6.7.1 人工路标导航	279
6.7.2 自然路标导航	280
6.7.3 灯塔导航	280
6.8 惯性与罗盘导航	282
6.8.1 惯性导航	282
6.8.2 罗盘导航	284
6.9 视觉导航	285
6.9.1 目标跟踪导航	285
6.9.2 路径跟踪导航	285
6.9.3 基于平行线的视觉导航	286
6.9.4 视觉罗盘	287
6.10 同时定位与地图构建	289
6.10.1 SLAM 的流程	289
6.10.2 SLAM 涉及的问题	291
本章小结	292
参考文献	293
第 7 章 路径与运动规划	295
7.1 非完整运动约束下的无障碍点到点运动规划	295

7.2 移动机器人的全局路径规划	300
7.2.1 移动机器人路径规划概述	300
7.2.2 基于图论的全局路径规划	300
7.2.3 基于栅格法的全局路径规划	308
7.3 移动机器人的局部路径规划	316
7.3.1 人工势场法	316
7.3.2 模糊逻辑法	320
7.3.3 动态栅格法	324
7.4 操作手臂的运动规划	326
7.4.1 关节空间的运动规划	327
7.4.2 笛卡儿空间运动规划	331
本章小结	334
参考文献	335
第8章 控制方法与策略	337
8.1 常用控制方法	337
8.1.1 PID控制	337
8.1.2 变结构控制	338
8.1.3 自适应控制	341
8.1.4 模糊控制	342
8.1.5 神经元网络控制	343
8.2 行为控制	344
8.2.1 路径跟踪行为	345
8.2.2 动态目标跟踪和静态目标趋近行为	349
8.2.3 沿墙行走行为	351
8.2.4 穿门和狭窄通道拐弯行为	354
8.2.5 避障、漫游和区域覆盖行为	357
8.3 移动平台趋近目标控制策略	358
8.3.1 移动平台搜索目标	359
8.3.2 移动平台趋近目标	359
8.3.3 移动平台对准目标	362
8.4 机械手趋近目标控制策略	363
8.4.1 机械手趋近目标	363
8.4.2 机械手对准目标	364
本章小结	366
参考文献	366

第 9 章 典型应用示例	368
9.1 开关门	368
9.1.1 机器人的系统构成	368
9.1.2 开关门	373
9.2 取物	375
9.2.1 任务描述	375
9.2.2 环境地图构建	377
9.2.3 到达目标	378
9.2.4 自主取物	379
9.2.5 返回并放置物品	379
本章小结	380

第 1 章 绪 论

随着科学技术的发展及社会的需要，服务机器人技术得到了迅速的发展。目前，服务机器人的应用范围已经涉及清洁、医疗、导游、教育、娱乐、安保、日常生活等多个领域。应用服务机器人不仅可以降低劳动力成本上升所造成的影响，而且可以使人们摆脱一些繁琐枯燥的工作。服务机器人具有不知疲倦以及按照人们意愿工作的特点，可以大大减轻人们的劳动强度、提高人们的生活质量。

尽管服务机器人技术的发展还未达到所期望的程度，但是服务机器人正不断地渗透到各行各业中，逐渐地为人们提供生活便利，提高生活质量。现代社会的人口老龄化以及人们生活质量的提高，将为服务机器人创造更为广阔的市场，也必将促进服务机器人技术的更快发展。在不久的将来，服务机器人将走进千家万户，改善人们的生活方式，提高人们的生活质量，成为人类的得力助手。

1.1 服务机器人的基本概念与发展历程

1.1.1 服务机器人的定义

尽管服务机器人技术已经取得了很大进展，但是到目前为止，对服务机器人还没有一个统一的定义。国际机器人联合会关于服务机器人的初步定义如下^[1]：服务机器人是一种半自主或全自主工作的机器人，它能完成有益于人类的服务工作，但不包括从事生产的设备（a robot which operates semi or fully autonomously to perform services useful to the well being of humans and equipment, excluding manufacturing operations）。欧美国家大多采用这种定义方式。而亚洲许多国家认为^[2]：服务机器人是一种以半自主或全自主的方式操作，用于完成对人类福利和设备有用的服务（制造操作除外）的机器人。这种定义所包括的机器人的范围更小，但更贴近普通人的理解。还有其他一些关于服务机器人的定义，例如：服务机器人是能在日常环境中完成对于人类活动有用的服务的、基于传感器的、可预编程的机电一体化装置。

从广义上来说，服务机器人是指除工业机器人之外的各种机器人，主要应用于服务，像清洁机器人、娱乐教育机器人、康复机器人、老年及残疾人护理机器人等^[3]。狭义的服务机器人一般只包括家用服务机器人、教育娱乐机器人等，但不包括医用机器人。

我国的服务机器人定义范围要窄一些，主要指用于对人类提供服务的自主或

半自主机器人, 主要包括: 清洁机器人、家用机器人、娱乐机器人、医用及康复机器人、老年及残疾人护理机器人、办公及后勤服务机器人、餐厅服务机器人等^[4]。

1.1.2 服务机器人的分类

服务机器人的种类繁多、功能多样化, 按照不同的分类标准, 服务机器人可划分以下类型。

1) 按照机械结构分类

按照机械结构的不同, 可以分为串联服务机器人、并联服务机器人、混联服务机器人。

2) 按照移动方式分类

按照移动方式的不同, 可以分为轮式移动服务机器人、履带式移动服务机器人、双足式移动服务机器人、多足式移动服务机器人、滚动式服务机器人、爬行服务机器人、跳跃式机器人、飞行式服务机器人以及水下推动力服务机器人等。

3) 按照用途分类

按照用途的不同, 可以分为建筑机器人、医疗机器人、家政机器人、农业机器人、林业机器人、交通/运输机器人、水下机器人、旅馆及餐饮业机器人、军事及警察机器人、灭火机器人、娱乐机器人、教育机器人、导游机器人、康复机器人、检测机器人、仿人形机器人等。

4) 按照导航方式分类

按照导航方式的不同, 可以分为基于地图导航的服务机器人、基于创建地图导航的服务机器人、无地图导航的服务机器人等。

1.1.3 服务机器人的发展历程

欧美国家在服务机器人产品研制开发方面起步较早^[5]。欧洲在以康复机器人为代表的服务机器人方面的研究, 起源于 20 世纪 70 年代中期的 Spartacus 和 Heidelberg 操作手项目^[6]。1982 年荷兰开发了一个装在茶托上的实验用机械手, 主要完成喂饭和翻书。Manus 机器人^[7]的研究始于 1984 年, 其手臂包含 5 个自由度, 经过几年的测试后, 由荷兰的 Exact Dynamics BV 公司生产并投入市场。1987 年, 英国人 Mike Topping 研制了 Handy1 康复机器人样机, 使一个患有脑瘫的 11 岁男孩第一次能够独立就餐^[8]。美国 Stanford 大学开发的 MOVAR 机器人可以穿行到各个房间, 机械手上装有力传感器和接近觉传感器以保证工作安全可靠^[9]。1990 年, 美国运输研究会 (Transition Research Corporation, TRC) 推出其第一个服务机器人产品: 医院用的“护士助手”机器人。1993 年又推出主要用于医疗服务的商业化服务机器人 HelpMate^[10]。日本对机器人技术的研发

一直非常重视。在服务机器人方面,自1993年以来,医疗和福利的设备研发项目一直由ISTF(产业科学与技术前沿)计划提供支持。1996年本田公司推出令世人惊叹的仿人机器人P2,该机器人不但具有与人相仿的外形,而且能够完成与人的简单交流,能够独立演奏钢琴。在1997年日本举行的国际机器人展览会上, Sony 公司首次公开展示了机器狗“爱宝”。

2004年2月25日,世界第一届机器人会议在日本福冈市落下帷幕,会议发表了《世界机器人宣言》,与会代表一致认为,机器人领域正经历着从产业用机器人时代向生活用机器人时代的转变。

国内对服务机器人的研究起步较晚^[11]。20世纪90年代中期,服务机器人技术得到国内科研人员的关注。近年来,在国家“863”计划的支持下,我国在服务机器人的研究和产品研发方面已开展了大量工作,并取得了一定的成绩。1995年清华大学开发了一个7自由度移动式护理机器人^[12],以高位截瘫人员作为护理对象;北京航空航天大学、清华大学和海军总医院共同研制开发了用于脑外科手术的机器人^[13];哈尔滨工业大学研制了“导游机器人”、“迎宾机器人”、“清扫机器人”、“护士助手”和智能服务机器人“青青”等^[14];2003年8月,华南理工大学研制出了一张机器人护理病床^[15];中国科学院自动化研究所研制出了护士助手机器人“艾姆”智能保安机器人及智能轮椅等^[16]。2005年1月,我国863计划先进制造与自动化技术领域办公室和国家自然科学基金委联合组织召开了智能服务机器人战略研讨会^[17]。会上,国内外相关领域的20多位专家应邀作了专题报告,重点围绕世界服务机器人的发展动态、我国服务机器人的发展方向及“十一五”期间机器人技术的发展重点等问题进行深入研讨,将家用服务机器人的研发定为重要的发展目标。

1.2 服务机器人的研究领域

服务机器人是一个多学科交叉的综合性研究领域,其研究内容多、领域广,主要涉及机械结构与优化、传感技术、控制技术、信息交互技术等。具体来说,服务机器人的研究内容主要包括以下方面:机械结构设计及驱动、感知系统、控制系统、人机工程、应用研究等。

1.2.1 机械结构与驱动

机械结构是服务机器人的本体,也是服务机器人实现预定功能的基础。机械结构不但决定了服务机器人能否实现其预定的运动功能,同时也在某种程度上影响了服务机器人的控制性能。良好的机械结构有利于实现多样化的运动,同时能够提高服务机器人对环境的适应能力。具体来讲,机械结构与驱动主要包括

以下几个方面。

1. 移动方式的选择与移动结构的设计

服务机器人的移动方式可以分为：步行、轮式、履带式、蠕动式、螺旋桨式、摆动式、跳跃式、泳动式以及复合式等。上述移动方式都有其各自的特点及其主要应用场合。

1) 步行移动

步行是人及大部分动物所具有的移动方式，也是机器人最复杂的一种移动方式^[18]。步行移动具有以下几个特点：对工作环境的适应性强，避障能力强，工作效率高，移动盲区小等。随着工作环境及工作任务的复杂化，步行移动方式将会得到不断的应用。

传统的双足机器人，如索尼公司的“QRIO”和本田公司的“Asimo”等，多采用主动式步行移动^[19]。这种步行方式主要通过大力矩、高增益反馈，并结合上层的轨迹规划和姿态平衡控制等，以保证步行运动过程中的稳定性。但其控制系统比较复杂，对驱动系统的性能要求也比较高，而且效率较低。针对这种情况，McGeer^[20]提出了被动步行方法。被动步行主要通过模仿人类行走的本质特征，在转动关节处增加弹簧等储能元件，充分利用机器人自身的被动动力学特性，使被动机器人具有类似自然的步态，从而提高其能量效率，增强其鲁棒性。被动步行移动中，机器人的控制系统及驱动系统相对简单，其稳定性并不依赖于复杂的轨迹规划和轨迹跟踪控制，而是充分利用本身的被动动力学特性，通过离线或在线的参数调整实现。

被动步行的主要研究问题包括：稳定性问题、能量问题、控制与学习问题等。针对这些问题，很多科研单位开展了研究工作并取得了一定的研究成果。Cornell 大学^[21]研制开发的半被动步行机器人具有 5 个自由度，分别为 1 个髋关节自由度、2 个不受控的膝关节自由度、2 个具有储能元件和驱动装置的踝关节自由度。通过联动机构，保证机器人身体总是位于两腿的角平分线上，并使双臂与两腿的运动关联。Wisse 等^[22]构建了具有 5 个自由度的 3D 半被动机器人。其中，髋关节是由气动肌肉驱动。踝关节采用特殊的机构设计，将机器人的侧倒运动和转向运动相耦合，从而使机器人能够按照一定的速度实现 3D 稳定步行。此外，麻省理工大学、东京理工大学等也对被动步行机器人进行了研究。

2) 轮式移动

轮式移动具有机械结构简单、运动灵活度大、稳定性高、操作性好等优点。此外，借助光电码盘等检测设备，可以很方便地测得轮子的转动圈数及转动速度，通过变换很容易测得机器人的位移、速度及加速度等运动参数。

目前，差动轮系结构是应用最为广泛的一种轮式结构。差动轮系结构通常包

括一个平衡轮（万向轮）及两个差动驱动轮。差动轮系结构主要利用两个驱动轮之间的速度差来实现对机器人运动方位的控制。当两个驱动轮以相同的角速度转动时，机器人将沿直线运动；当两个驱动轮之间存在角速度差时，机器人移动方向将发生变化。

但是在实际应用中，轮式结构的机器人并不满足“轮子是纯滚动的”这一假设。通常情况下，轮式结构的机器人存在滑动、侧移等现象，给机器人的精确定位带来了困难。

3) 履带式移动

履带式移动主要依靠履带与地面之间的纯滚动而产生运动的一种移动方式。同一般轮式移动方式相比较，履带式结构具有对路面的适应性强，翻越障碍能力强，允许推力大，系统稳定可靠等特点。它能通过各种复杂的地形，并可以工作在恶劣的环境下，代替人完成具有危险性的工作。目前侦察机器人、排爆机器人^[23]等广泛采用履带式结构。

4) 蠕动式移动

蠕动式移动的主要特点是无肢行走。它是靠垂直机体所在平面（或曲面）的蠕动波来传递动力，实现其机体的向前运动。蠕动式移动具有无足及多点驱动等特性，使其具有稳定性好、通过截面小等优点。通常，蠕动式结构主要用于作业空间狭小的机器人，如管道检测机器人。蛇形机器人就是通过迂回运动方式实现在其机体所在平面（或曲面）内的运动。

5) 泳动式移动

泳动式移动主要指在流体环境中，利用躯体或者尾部的摆动产生推力的一种移动方式。与传统的螺旋桨式推动相比，泳动式移动技术具有高效率、低噪声、高机动性、良好下潜性等特点。基于以上特点，泳动式移动技术在仿生机机器人鱼、血管微型机器人、海底勘探机器人等得到了广泛应用。随着流体力学理论不断发展以及系统仿真技术的出现，在大量的水洞试验的基础上，对鱼类推进机制的研究推动了泳动式移动技术的迅速发展。中国科学技术大学将二维波动板理论发展为三位波动板理论^[24]，并用半解析-半数值的方法得到了三维非定常线性解。

6) 复合式移动

在某些工作环境及工作任务比较复杂的情况下，要求机器人能够适应不同的环境条件，满足不同的工作要求，这就对机器人的移动技术提出了挑战。例如，水陆两栖机器人不仅要在陆地上运动，而且也要在水中运动。单一的移动技术往往不能满足复杂运动任务的要求，而复合移动技术是解决这类问题的一条重要途径。同时，复合式移动也大大提高了服务机器人对环境的适应能力。