

信息化与工业化 两化融合
研究与应用丛书

移动机器人自主控制 理论与技术

沈林成 徐 昕 主编
朱华勇 胡天江

 科学出版社

内 容 简 介

移动机器人技术在工业、农业、军事和交通运输业中具有广泛的应用前景,是国家工业化与信息化进程中的关键技术和重要推动力。由于应用环境和任务的复杂性,提高移动机器人自主行为能力的自主控制理论与技术是当前机器人学研究的前沿和热点领域。本书内容结合作者多年来的研究成果,围绕移动机器人自主控制的若干核心问题展开论述。内容包括空中、地面与水下移动机器人自主控制的新理论、新技术及其应用概况,重点阐述了无人机自主控制、旋翼飞行机器人自主控制、多无人机协同控制、地面无人车辆自动驾驶的关键理论与技术,动力学约束下基于微分平坦的智能车辆轨迹规划、水下机器人仿生流场适应性控制、移动机器人SLAM技术,提高移动机器人自主行为能力的增强学习理论与方法等方面的内容。本书反映了作者在相关领域的最新研究工作,具有新颖性、前沿性、理论与应用密切结合的特点。

本书可作为高等学校与科研院所中从事机器人与智能控制、模式识别等专业领域的研究用书,也可作为自动化、计算机领域其他相关专业师生及科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

移动机器人自主控制理论与技术/沈林成等主编. —北京:科学出版社, 2011

(信息化与工业化两化融合研究与应用丛书)

ISBN 978-7-03-030455-1

I. 移… II. 沈… III. 移动式机器人-智能控制 IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 035890 号

责任编辑:姚庆爽/责任校对:包志虹

责任印制:赵博/封面设计:黄华斌

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年4月第一版 开本:B5(720×1000)

2011年4月第一次印刷 印张:20

印数:1—3 000 字数:383 000

定价:70.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

移动机器人是一类能够通过传感器感知环境和自身状态，实现在复杂未知环境中的自主运动，并完成预定任务的机器人系统。移动机器人系统在工业、农业、军事和交通运输业中具有广泛的应用前景，是国家工业化与信息化进程中的关键技术和重要推动力。由于应用环境和执行任务的复杂性，未来移动机器人需要更加全面的环境感知与认知能力，复杂条件下的自主导航、规划与控制能力，多机器人分布自主协同能力，人机智能融合与学习适应能力，提高移动机器人自主行为能力的自主控制理论与技术是未来机器人技术发展的重要趋势之一。所谓自主控制，是指在不需要人的干预条件下，移动机器人通过在线环境感知和信息处理，自主生成优化的控制策略，完成各种任务，并且具有快速而有效的任务自适应能力。目前，自主控制理论与技术已成为移动机器人领域的研究前沿和热点，对于环境感知与认知、运动规划与智能控制、复杂系统与仿生学等相关理论与技术的研究提出了新的挑战。

2009年11月1日至3日，中国自动化大会暨两化融合高峰会议在杭州召开。来自中国科学院、清华大学、浙江大学、国防科学技术大学等科研机构和院校的12位院士和300多名专家学者参加了本次大会。本次大会共分为12个专题，国防科学技术大学承担了“机器人与模式识别技术及应用”T5专题的组织工作，邀请中国科学院自动化研究所、中国科学院沈阳自动化研究所、中国科学技术大学、吉林大学、北京航空航天大学、南京理工大学、西北工业大学、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、香港中文大学等相关单位参与专题交流，共安排9个特邀专题报告。会议围绕移动机器人自主控制的若干前沿研究领域展开了广泛深入的学术交流。以2009中国自动化大会的成功召开为契机，我们邀请了移动机器人自主控制领域的专家学者参与本专著的撰写，并作为《信息化与工业化两化融合研究与应用丛书》的一册正式出版，以推动我国移动机器人自主控制理论与技术及相关研究领域的发展。

本书主要包括空中、地面与水下移动机器人自主控制的新理论、新技术及其应用概况，重点阐述了无人机自主控制、旋翼无人机自主控制、多无人机协同控制、地面无人车辆自动驾驶技术、智能车辆轨迹规划、水下机器人仿生流场适应性控制、移动机器人SLAM技术、提高移动机器人自主行为能力的增强学习理论与方法等方面的内容。本书的一个重要特色就是覆盖了空中、地面、水下等不同应用环境的移动机器人自主控制理论与技术，既考虑了不同应用环境移动机器

人自主控制系统的区别，又探讨了移动机器人自主控制的共性理论与方法。在内容覆盖具有全面性的同时，本书的各部分内容紧密结合作者的科研工作和应用实践，充分体现了作者的研究特色和专长，保证了学术内容论述的深入性和严谨性。反映了作者在相关领域的最新研究工作，具有新颖性、前沿性、理论与应用密切结合的特点。

本书由沈林成、徐昕、朱华勇、胡天江主编。参加专著撰写的主要人员（排名不分先后）包括：北京航空航天大学的王英勋、周锐，中国科学院沈阳自动化研究所的王越超、韩建达，吉林大学的陈虹、丛岩峰，南京理工大学的杨静宇、金忠，中南大学的蔡自兴、陈白帆，国防科学技术大学的沈林成、徐昕、朱华勇、胡天江、张庆杰、牛轶峰、刘春明等。徐昕、胡天江、牛轶峰、周晗、刘春明、雷鑫、李兆斌等承担了全书的统稿、审核与校对工作。在完成本书的过程中得到了国内外许多专家、学者的帮助，要特别感谢孙优贤院士和2009中国自动化大会组委会全体人员。本书的研究成果还得到了国家自然科学基金（重点支持项目：90820302，青年基金项目：60805037、61005077，面上项目：60774076，61075072）、霍英东青年教师基金优选资助课题（114005）的资助，在此向国家自然科学基金委员会表示感谢。

由于本书涉及内容广泛，从空中到水下，从理论到应用，从方法到技术，涵盖了移动机器人自主控制领域的研究热点和难点，加之编著者水平有限，书中难免存在欠妥之处，诚恳地希望各位专家读者不吝赐教和指正，对此我们表示衷心感谢。

沈林成 徐昕

2010年10月10日于国防科学技术大学

目 录

《信息化与工业化两化融合研究与应用丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 移动机器人系统与技术的发展概况	1
1.1.1 移动机器人系统体系结构的发展	1
1.1.2 移动机器人的关键技术与应用	2
1.1.3 无人系统技术的发展概况	4
1.1.4 移动机器人技术的发展趋势	4
1.2 移动机器人自主控制的内涵与研究概况	5
1.2.1 移动机器人自主控制的内涵	6
1.2.2 移动机器人自主控制的研究概况	8
1.3 本书内容的组织与结构	13
参考文献	16
第 2 章 未来无人机的典型特征——自主控制	20
2.1 引言	20
2.2 自主控制的概念和发展	20
2.2.1 无人机自主控制的概念	21
2.2.2 无人机自主控制的发展	22
2.3 无人机自主水平等级	23
2.3.1 国外自主水平等级评估方法	23
2.3.2 一种通用自主水平等级的评估方法	30
2.3.3 自主控制能力	31
2.4 无人机自主控制体系结构与技术	35
2.4.1 无人机自主控制系统体系结构	35
2.4.2 无人机单机自主控制关键技术	38
2.4.3 多无人机自主协同控制及关键技术	49
2.5 无人机自主控制展望	53
2.5.1 自主控制系统的综合智能结构模式及系统优化研究	54
2.5.2 面向环境感知的智能化实时图像融合技术研究	54
2.5.3 在线态势感知及实时自主控制决策、快速任务规划技术研究	54

2.5.4	故障诊断、容错控制技术和健康管理技术研究	55
2.5.5	人工智能技术在无人机自主控制系统中的应用研究	55
2.5.6	基于无人机群控及与有人机协同作战的自主控制技术研究	55
	参考文献	56
第3章	旋翼无人机自主飞行控制方法	58
3.1	引言	58
3.2	ServoHeli 旋翼无人机试验平台	59
3.2.1	平台机械结构概述	59
3.2.2	ServoHeli 旋翼无人机航电系统简介	59
3.3	旋翼无人机先进控制方法研究	60
3.3.1	旋翼无人机系统建模	60
3.3.2	基于加速度反馈的旋翼无人机鲁棒控制方法	64
3.3.3	其他先进控制方法	75
3.4	飞行试验及结果分析	78
3.4.1	基于自适应机制的全包络飞行试验	78
3.4.2	面向信息获取的全自主飞行试验	80
3.4.3	旋翼无人机容错控制飞行试验	81
3.5	小结	82
	参考文献	83
第4章	多无人机协同控制方法	85
4.1	引言	85
4.2	网络化环境下多无人机协同规划	86
4.2.1	分布式协同任务分配方法	86
4.2.2	分布式协调航迹规划方法	91
4.2.3	无人机集群任务规划应用	99
4.3	多无人机自组织行为	100
4.3.1	多无人平台自组织行为的概念	100
4.3.2	自组织行为方法原理	104
4.3.3	自组织行为的应用实例	115
4.4	有人/无人协同控制方法	125
4.4.1	有人机/无人机协同的概念及技术挑战	125
4.4.2	有人/无人协同控制方法	127
4.4.3	有人/无人协同控制应用实例	138
4.5	小结	141
	参考文献	141

第 5 章 地面智能车辆自动驾驶技术	144
5.1 引言	144
5.2 环境感知与识别的研究概况和发展趋势	146
5.2.1 车道线识别	146
5.2.2 障碍检测	147
5.2.3 恶劣天气下的视觉图像处理	148
5.2.4 多传感器信息融合	149
5.3 车辆自主决策与运动规划技术的研究	149
5.4 动态环境中车辆控制系统分析与控制	150
5.4.1 高速行驶车辆系统的状态估计	150
5.4.2 车辆智能驾驶系统的混合优化控制方法	151
5.4.3 高速车辆智能驾驶系统的性能评估	152
5.4.4 智能车辆异常状态诊断与容错控制	153
5.5 小结	153
参考文献	153
第 6 章 地面智能车辆动力学建模与轨迹规划方法	159
6.1 引言	159
6.2 车辆动力学模型	160
6.2.1 车辆的运动学模型	160
6.2.2 车辆的动力学模型	162
6.2.3 车辆的轮胎模型	163
6.3 基于微分平坦的轨迹规划	167
6.3.1 轨迹规划	167
6.3.2 微分平坦	168
6.3.3 系统状态与输入的平坦输出表示	170
6.3.4 约束的平坦输出表示	173
6.3.5 性能指标的平坦输出表示	174
6.4 仿真分析	177
6.4.1 最大加速度约束	177
6.4.2 半圆路径函数仿真分析	177
6.4.3 正弦路径函数仿真分析	182
6.5 小结	187
参考文献	187
第 7 章 水下机器人仿生流场适应性控制方法	189
7.1 引言	189

7.2	仿生水下机器人现状及挑战	191
7.2.1	尾鳍模式仿生水下机器人研究进展	192
7.2.2	胸鳍模式仿生水下机器人研究进展	194
7.2.3	波动鳍模式仿生水下机器人研究进展	195
7.2.4	仿生水下机器人的挑战	196
7.3	仿生流场适应性技术内涵	198
7.3.1	仿生流场适应性技术的定义	198
7.3.2	仿生流场适应性技术的定位	199
7.3.3	仿生流场适应性技术的分类	200
7.4	仿生流场适应性控制方法	201
7.4.1	研究思路	201
7.4.2	控制结构	202
7.4.3	算法描述	204
7.5	仿生流场适应性控制应用实例	206
7.5.1	仿生波动鳍及实验平台	206
7.5.2	仿生波动适应性控制系统	208
7.5.3	仿生波动鳍适应性控制实验	209
7.6	小结	211
	参考文献	212
第8章	移动机器人环境感知的模式特征抽取理论	219
8.1	引言	219
8.2	主分量分析	220
8.2.1	K-L变换	220
8.2.2	非线性主分量分析	221
8.2.3	二维主分量分析与张量分析	222
8.3	鉴别分析	223
8.3.1	线性鉴别分析	223
8.3.2	小样本问题	224
8.3.3	非线性鉴别分析	224
8.3.4	二维线性鉴别分析	225
8.4	流形学习	226
8.4.1	流形学习定义	226
8.4.2	图嵌入方法	226
8.4.3	主流形方法	227
8.5	基于稀疏性理论的图像特征抽取	228

8.5.1 稀疏表示理论	228
8.5.2 压缩感知理论	229
8.5.3 Kernel 学习理论的稀疏表示	229
8.5.4 图像模式的稀疏性	230
8.6 独立分量分析	230
8.7 研究趋势	232
8.8 模式特征抽取在移动机器人环境感知中的应用	233
8.8.1 障碍物检测	233
8.8.2 地表覆盖分析	234
8.8.3 可通行区域的确定	235
8.9 小结	236
参考文献	236
第 9 章 移动机器人同时定位与构图的数据关联技术	248
9.1 移动机器人同时定位与建图综述	248
9.2 移动机器人 SLAM 模型及原理	250
9.2.1 SLAM 系统模型	250
9.2.2 移动机器人运动模型	251
9.2.3 路标模型	252
9.2.4 传感器观测模型	253
9.2.5 SLAM 解决思想	254
9.3 基于粒子群优化的 PF-SLAM	254
9.3.1 粒子滤波方法的不足	255
9.3.2 粒子群优化的原理	256
9.3.3 融合粒子群优化的 SLAM 算法	257
9.3.4 实验及结果分析	259
9.4 移动机器人 SLAM 中的数据关联问题	261
9.4.1 SLAM 中的数据关联问题的描述	262
9.4.2 ICNN 数据关联方法	263
9.4.3 JCBB 数据关联方法	264
9.4.4 基于粒子滤波的多假设数据关联方法	265
参考文献	270
第 10 章 提高移动机器人自主行为能力的增强学习理论与方法	273
10.1 引言	273
10.2 增强学习理论与算法研究概述	275
10.2.1 增强学习的马氏决策过程模型	275

10.2.2	平稳控制策略值函数估计的 TD 学习理论	276
10.2.3	基于值函数逼近的 MDP 学习控制算法	278
10.2.4	基于直接策略搜索与近似策略迭代的学习控制算法	279
10.2.5	具有自适应评价设计结构的学习控制	280
10.2.6	增强学习在移动机器人自主控制中应用的概况	282
10.3	连续行为空间近似策略迭代算法 CAPI	282
10.3.1	CAPI 算法的基本框架	283
10.3.2	CAPI 中的自适应基函数的自动选择	286
10.4	基于近似策略迭代的移动机器人自主避障控制	291
10.4.1	移动机器人系统的感知与运动特性	292
10.4.2	基于滚动窗口的局部路径规划	292
10.4.3	移动机器人自主避障的马氏决策过程建模	293
10.4.4	基于近似策略迭代算法的移动机器人自主避障	294
10.5	小结	296
	参考文献	296
	缩略语	301

第 1 章 绪 论

沈林成 徐昕 胡天江 牛轶峰

1.1 移动机器人系统与技术的发展概况

机器人技术综合多学科的发展成果，代表了高端技术的发展前沿。宋健院士曾指出“机器人学的进步和应用是 20 世纪自动控制最有说服力的成就，是当代最高意义上的自动化”^[1]。移动机器人是一类能够通过传感器感知环境和自身状态，实现在复杂未知环境中面向目标的自主运动，并完成预定任务的机器人系统^[2,3]。移动机器人与其他机器人的不同之处就在于强调了“移动”的特性，比固定式机器人（如机械手）具有更大的活动范围、更大的灵活性与更广的应用领域。移动机器人不仅能够生产、生活中起到越来越大的作用，而且还是研究复杂智能行为的产生、探索人类思维模式的有效工具与实验平台。移动机器人技术是近年来国际机器人学和人工智能领域研究的一个热点，该技术在工业、交通运输、医疗康复、服务业、航天和国防等领域都有广阔的应用前景。移动机器人按照自主性的不同可以分为遥控、半自主和自主三种类型，其中自主式移动机器人对于环境具有感知、决策和适应能力，从而能满足更为广泛的任务需求。实现移动机器人的自主性，特别是在动态、不确定环境中的自主性，对于移动机器人的体系结构、感知与认知、规划与控制技术和有关的人工智能理论和方法都提出了挑战性的课题^[4]。

1.1.1 移动机器人系统体系结构的发展

由于移动机器人特别是自主式移动机器人对环境的感知和适应能力往往体现出一种智能行为，因而对移动机器人系统体系结构的研究也主要从人工智能的观点出发来探索智能行为的实现问题。早期的研究工作主要提出了两类不同的移动机器人体系结构，即基于符号表示的功能分层体系结构和基于行为的体系结构。前者从符号智能的观点出发，将机器人系统按功能分层，底层基本不具备智能特性，仅仅完成环境信息的获取和上层命令的执行；高层则在接收底层信息的基础上对环境进行符号建模，并利用已有的知识进行推理和决策。后者从人工智能的行为主义学派观点出发，将机器人系统分为若干并行的行为模块，每个行为模块直接与环境交互，完成机器人的某一功能，在行为模块中没有对环境的建模和符号表示，而以“if 条件 then 行动”的规则形式依据传感器信息进行行为决策。

功能分层体系结构由 Fikes、Hart 和 Nilsson 等于 20 世纪 70 年代提出^[5]，并基于该结构设计了 Strip-Planex 移动机器人系统，其后有许多移动机器人系统都采用了类似的体系结构。但通过大量研究发现，基于符号表示的功能分层体系结构仅能在结构化、确定性环境中获得较好的应用效果，而对于动态、非结构化和不确定环境中的机器人应用则难以满足要求，在复杂环境中要建立环境的符号表示和进行符号推理往往极为困难且无法达到实时性。

基于行为的移动机器人体系结构最早由 Brooks 提出^[6]，并成为人工智能行为主义学派的主要观点。在 Brooks 提出的机器人包容 (subsumption) 结构中，若干并行的行为模块直接完成从传感器信息到执行器动作的映射功能，同时行为模块之间具有一定的控制和选择机制，但整个系统没有一个集中的控制模块。基于行为的机器人体系结构具有反应式系统的特点，无需对环境建模、表示和推理，对动态、不确定环境具有一定的适应能力，采用该体系结构构造的机器人系统能够有效地完成在不确定环境中的避障等行为。Brooks 据此提出了没有推理和表示的 intelligent 的观点。但经过深入研究后人们发现，基于行为的反应式机器人系统仅能完成一些基本的类似“昆虫”的智能行为，而无法适应复杂任务的要求。

针对上述两种体系结构的优缺点，近年来开展了一些将两种体系结构的特点相结合的混合式体系结构的研究工作。如基于 LICA (locally intelligent control agent) 的体系结构^[7]、Somass 系统的体系结构^[8]以及 Chella 等提出的三层体系结构^[9]。基于 LICA 的体系结构具有多个反应式行为模块，同时具备一定的推理能力，其中的一部分行为模块可以完成类似于功能分层结构中的符号表示层的功能。在 Somass 系统中，采用类似于 Strips-Planex 系统的高层推理模块，在底层采用行为模块完成从符号表示到执行器动作的转换。Chella 等提出的三层体系结构则较好地结合了功能分层的体系结构和基于行为的反应式体系结构各自的优点。在该体系结构中，底层由多个行为模块构成，称为子概念层 (subconceptual level)，其具有反应式系统的特点，能够完成避障等反应式行为；中间层称为概念层 (conceptual level)，由独立于符号语言的认知信息描述构成；最高层称为语言层，对基于符号语言表示的信息进行处理。

混合式体系结构由于结合了功能分解型体系结构和包容式体系结构的优点，同时有效地避免了两者的缺点，因此成为目前自主移动机器人体系结构研究的重要方向。在这一领域，为适应未知或快速变化环境的要求，移动机器人系统的研究需要进一步对系统的自适应和学习模块的功能集成进行研究。目前针对进化机器人和其他基于学习的自主移动机器人体系结构都体现了上述思想^[10]。

1.1.2 移动机器人的关键技术与应用

移动机器人技术涉及电子、机械、控制、计算机、仿生学等众多学科领域，

其关键技术包括移动平台设计、控制体系结构、路径规划、环境感知与信息融合以及运动控制等方面。随着相关技术的发展,移动机器人系统已经在工业制造、军事、医疗和科学研究等许多方面得到了广泛的应用。特别是随着社会发展和科技进步,人类研究和活动领域已由陆地扩展到海洋和空间。利用移动机器人进行陆、海、空、天全方位探测和开发,已成为21世纪世界各科技发达国家拓展生存空间、加强资源储备的主要手段。

根据活动领域的不同,移动机器人可以分为空中机器人、地面机器人、水中机器人等^[11~13]。空中机器人包括空中无人机(unmanned aircraft vehicle, UAV)、无人飞艇(unmanned airship)等,地面机器人包括地面无人车辆(unmanned ground vehicle, UGV)、足式步行机器人等,水中机器人包括无人水面艇(unmanned surface vehicle, USV)和无人潜航器(unmanned undersea vehicle, UUV)等。美国国防部继2000年、2002年和2005年三次发布无人机路线图之后,2007年底首次推出包括无人机系统、无人地面系统和无人水中系统的无人系统路线图,2009年又发布了新一版的无人系统路线图。

空中移动机器人的典型代表是无人机,这类机器人活动空域大、运动速度快,居高临下而不受地形限制。1917年世界上第一架无人飞机在英国研制成功。自20世纪60年代开始,无人机得到广泛应用。无人机的发展经历了靶机—无人侦察机—一次性使用攻击机—察/打一体化无人机—无人作战飞机的发展历程,其使命由早期的靶机、情报/监视/侦察、电子软/硬杀伤发展到察/打一体乃至真正意义的智能化作战型无人机^[14,15]。2001年11月,一架“捕食者”无人机发射了两枚“海尔法”导弹,击毙了“基地”组织的第二号人物穆罕默德·阿提夫,开创了无人机作战运用的先河。

地面移动机器人的典型代表是月球车,由美国和原苏联为完成月球探测计划而设计和研制^[16,17]。美国的移动机器人“探测者3号”,能在地面的遥控下,完成在月球上挖沟的操作并且可执行其他探测任务。原苏联的移动机器人“登月者20号”能够通过遥操作在月球表面钻削岩石,并把土壤和岩石样品装进回收容器并送回地球。除了工业领域应用的各种自动导引运输车辆,在交通运输和军事领域应用的无人驾驶智能车辆也是一类重要的地面移动机器人系统。在交通运输方面,智能车辆相关技术的研究和发展将为汽车主动安全和交通安全,以及未来的智能交通系统提供关键技术支撑。在军事方面,军用地面智能车辆在20世纪80年代开始取得了长足的发展,既考虑战场应用,又考虑技术推动,执行任务由侦察和后勤支援发展为扫雷、排爆、侦察等。截至2007年底,美国陆军已经在伊拉克和阿富汗部署了5000多个地面机器人。此外,仿人步行机器人也是一类具有重要研究价值的地面移动机器人。20世纪70年代初期,日本早稻田大学研制出第一台功能较全的两足步行机器人。近年来,各种类人型移动机器人系统

的研究取得了大量研究成果, 已经开始在肢体运动、视听觉、语言和表情等各个层面上实现对人类功能的模拟。

水下移动机器人的典型代表是无人自治潜航器, 它能够在人类无法到达的海洋深度和广度上进行探测、识别和作业^[18,19]。加拿大 ISE 公司研制的水下机器人已经应用于深海生物研究、极地和深海海洋石油调查勘探、墨西哥湾海底天然气的泄漏探测等方面。2008 年, 我国自主研发的自主与遥控混合作业模式水下机器人“北极 ARV”在北纬 84 度北冰洋海域成功完成冰下调查, 获得了北极冰底形态、海冰厚度等多种科学观测数据, 实现了对北极冰下海冰物理特征、水文特征和光学特性的同步观测。

1.1.3 无人系统技术的发展概况

移动机器人系统由移动平台、传感器、控制系统、作业载荷以及遥控操作器等组成^[11,12]。自 20 世纪 90 年代以来, 研究人员结合军事应用等明确需求, 从系统角度对移动机器人进行研究, 尽管有些移动机器人仍需诸如遥控等人在回路的干预, 但是移动机器人作业过程中平台本身并不需要人的直接介入, 即具有“平台无人”的特征, 所以移动机器人也可称为“无人系统”(unmanned system, US)。随着科学技术的发展, 移动机器人开始在陆、海、空、天等领域全方位地承担越来越多的任务, 在经济、国防、教育、文化和日常生活中起到越来越大的作用, 但是, 由于移动机器人种类的日益增多, 系统也越来越复杂, 对技术的需求和挑战也越来越大, 迫切需要加强顶层规划。为此, 美国军方最早开始为移动机器人的发展制定路线图。美国先后在 2001 年、2003 年、2005 年为空中机器人(无人机)的发展制定路线图, 在 2007 年和 2009 年, 开始把地面机器人和水中机器人统一纳入无人系统, 形成了综合的无人系统路线图。图 1.1 为美国国防部制定的军用移动机器人(无人系统)发展路线图(2007 年版)^[20], 美军计划未来 10 年内智能机器人成为未来军队的主要战斗力量, 到 2010 年前, 三分之一的“纵深”打击行动由空中机器人完成, 到 2015 年前, 三分之一的地面战斗由地面机器人完成。

1.1.4 移动机器人技术的发展趋势

移动机器人可以代替人执行“枯燥的、恶劣的、危险的、纵深的”(dull, dirty, dangerous, deep)任务, 其中枯燥任务指重复性或者持久性的任务; 恶劣任务指环境涉及恶劣天气, 以及核辐射、生物、化学污染等威胁的任务; 危险任务指对机器人和操作人员具有高风险的任务; 纵深任务指超越当前有人系统使用半径的任务。在执行这些任务时, 移动机器人系统更胜于人或有人系统。由于需求的牵引和技术的推动, 未来移动机器人技术的发展呈现以下趋势:

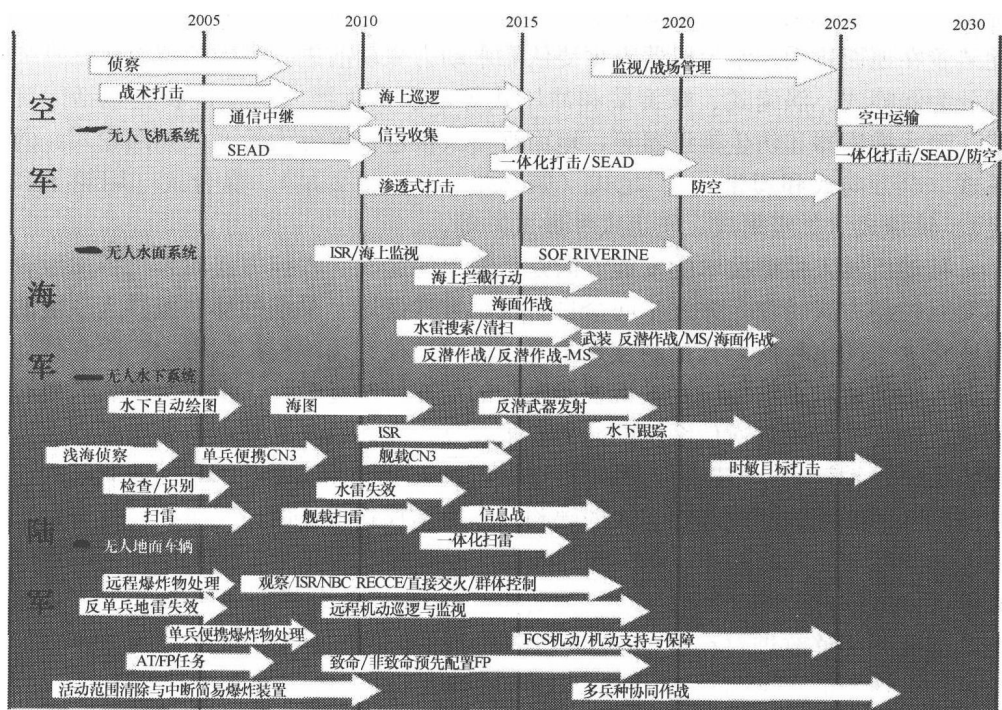


图 1.1 美国国防部移动机器人（无人系统）发展路线图（2007 年版）

- (1) 采用更先进的控制技术，发展更高级的自主式移动机器人；
- (2) 采用更先进的传感器，提高机器人对环境以及自身状态的感知能力；
- (3) 以柔性结构替代刚性结构，提高机器人操作灵活度；
- (4) 发展人工智能与信息处理技术，提高移动机器人的智能化程度；
- (5) 发展仿人和仿生技术，提高移动机器人环境适应能力；
- (6) 实现移动机器人的通用化、标准化和模块化，为多种不同移动机器人协同工作创造条件。

可以预见，在 21 世纪各种先进的移动机器人系统将会进入人类生活的各个领域，成为人类得力的助手和亲密的伙伴。

1.2 移动机器人自主控制的内涵与研究概况

自主式移动机器人是一种具有自规划、自组织、自适应能力，并且能够在复杂的非结构化环境中工作的机器人。移动机器人随其应用环境和推进方式的不同，平台控制方式也有很大差别，不同的推进方式对其运动控制的精度和可靠性

提出了不同的要求。空中机器人主要依靠空气动力飞行，地面机器人主要依靠驱动装置在地面移动，水中机器人主要依靠水动力驱动前进。空中机器人的推进装置分为涡喷式、涡扇式、螺旋桨和冲压式等，水中机器人的推进装置包括螺旋桨、喷水推进器和仿生推进器等，地面机器人推进装置分为轮式（如四轮式、两轮式、全方向式和履带式）、足式（如 6 足、4 足和 2 足）、混合式（用轮子和足）、特殊式（如吸附式、轨道式和蛇式）等。

移动机器人控制技术的发展方向是由简单的遥控、程控方式向人机智能融合的交互控制方式转变，并逐步向全自主控制方式发展。早期的移动机器人系统的智能化水平还比较低，其控制方式主要以简单遥控和预编程控制为主。随着移动机器人智能化水平的提高，人机智能融合的交互控制逐渐处于主导地位。人机智能融合的交互控制对通信系统的能力要求较高，在面临复杂环境时，由于存在通信中断、遥控延时、链路带宽和距离受限以及人员操控能力等因素的限制，人机智能融合的交互控制仍存在很大的缺陷。在通信保持畅通的情况下，实现移动机器人自主控制，可减轻操作员的工作负荷，从而提高使用效能。美国国防部最新版《无人系统综合路线图（2009~2034）》^[21]指出，移动机器人自主能力和鲁棒性的提高，能够改进对环境的感知，提高目标定位的速度和精度，增强生存能力，扩大任务的灵活性，预计到 2015 年移动机器人将实现动态障碍规避，到 2034 年实现在线态势感知，具有完全自主能力。美国空军认为未来空中机器人首要技术需求是增加自主性，提高协同能力。到 2047 年，技术的进步将使完成“观察、判断、决策、行动”（observe, orient, decide, act, OODA）回路的时间缩短为微秒或纳秒级^[22]。因此，自主控制是移动机器人技术未来发展的必然方向^[23]。

1.2.1 移动机器人自主控制的内涵

国外学者对“自主控制”（autonomous control）的概念具有不同的定义。“自主”（autonomy）英文一词的含义为“自主权：自我管理或自我管理的权利；自主决定权”。Pachter 等^[24]认为自主控制是在非结构化环境下采取的“高度”自动控制，但这种定义强调无人干预，没有考虑环境感知等关键问题。Boskovic 等^[25]认为自主控制是包括在线感知、信息处理和重构等功能。Antsaklis 等^[26]指出由于没有人的直接控制，自主控制强调自我决策、自我控制，实现自主是控制的目标，而智能控制是实现自主的有效途径。国内对无人机的自主控制也开展了相关研究，目前尚处于起步阶段^[27,28]。

“自主”能力是移动机器人重要的技术特征，是移动机器人技术未来发展的主要方向。移动机器人的自主能力能够使其本体或编队在不确定环境中，依靠自身或协同的观察、定位、分析和决策能力完成特定任务。由于使用环境的高度

动态、不确定性以及任务的复杂性,使得实现移动机器人的自主能力面临一系列理论与技术的挑战。

移动机器人自主控制是指在不需要人工干预的条件下,通过在线环境感知和信息处理,自主生成优化的控制策略,规避各种障碍和威胁,完成各种特定任务,并且具有快速而有效的任务适应能力^[29]。自主控制可看做自动控制的高级发展阶段。“自主”控制与传统“自动”控制的区别就在于“自动”是基于数据驱动的,系统按照预定程序执行任务,没有环境感知与自主决策的能力,“自主”是基于信息,甚至是知识驱动的,系统根据任务需求自主完成“感知-决策-行为”的动态过程,并能够应对意外的情形、适应新的控制任务和容忍一定程度的失败。

移动机器人自主控制面临的挑战包括复杂、非结构化、意外的动态环境,不确定的、意外的事件和态势,远距离条件下复杂网络链路故障、突发系统故障、实时外部威胁等不确定性;高度复杂决策空间和强实时决策能力等需求;高速、高机动性、高隐身性平台以及柔性体系结构等系统复杂性。相应的,移动机器人自主控制的能力需求主要包括:

(1) 全面的环境感知与智能态势认知能力。为满足信息化条件下对信息保障全维、精确、实时的要求,未来的移动机器人将具备更加全面的环境感知能力,包括对各类天气条件(雨、雾、雪、沙尘、风切变、雷暴和紊流等)下,更广阔范围的自然环境目标与敌我目标的感知与识别等;同时,移动机器人在自主性能方面的不断提升将要求移动机器人具有智能环境态势的认知能力,因此,需要研究多传感器信息融合、复杂环境识别与目标检测和跟踪以及威胁分析与态势评估等技术。

(2) 不确定条件下的行为规划与决策能力。移动机器人在具备环境感知与战场态势认知能力的同时,需要进行复杂不确定条件下的自主行为规划与决策,对于各种动态环境具有灵活的自主性和抗干扰能力。需要研究自主行为决策、对抗环境下任务规划/重规划等技术。

(3) 大范围自主导航与控制能力。在未来复杂应用环境中,移动机器人不但要实现局部范围内的精确导航定位,以及复杂的动作控制,同时要实现大范围高精度的远程精确操作,需要研究大范围自主导航、高机动性移动机器人的鲁棒控制与智能控制以及故障诊断与容错控制等技术。

(4) 多机器人分布式自主协同能力。多移动机器人构成的大系统可以协同完成更多更复杂的任务,也具有任务复杂性、时空分布性、功能分布性和感知分布性等特征,需要研究多机器人协同任务控制中分布式任务分配与任务协调、多机器人编队自主运动控制等技术。

(5) 人机智能融合与学习适应能力。随着移动机器人智能化水平的提高,具