

兵器工业出版社重点学术专著出版项目

移动机器人 路径规划与轨迹跟踪

王仲民 著

WMR

兵器工业出版社

兵器工业出版社重点学术专著出版项目

移动机器人路径规划与轨迹跟踪

PATH PLANNING AND TRAJECTORY TRACKING
OF MOBILE ROBOT

王仲民 著

兵器工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

移动机器人路径规划与轨迹跟踪/王仲民著. —北京:
兵器工业出版社, 2008. 5

ISBN 978 - 7 - 80172 - 989 - 7

I. 移... II. 王... III. 移动式机器人—研究 IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 174238 号

出版发行: 兵器工业出版社

发行电话: 010 - 68962596, 68962591

邮 编: 100089

社 址: 北京市海淀区车道沟 10 号

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市登峰印刷厂

版 次: 2008 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

责任编辑: 刘燕丽

封面设计: 李 晖

责任校对: 郭 芳

责任印制: 赵春云

开 本: 850 × 1168 1/32

印 张: 6.5

字 数: 195 千字

定 价: 25.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

内容简介

本书针对移动机器人运动控制领域中的路径规划与轨迹跟踪问题进行了系统论述。全书由移动机器人全局路径规划、局部路径规划及非完整轮式移动机器人的轨迹跟踪控制等三部分内容构成,涵盖了作者近年来在移动机器人路径规划与轨迹跟踪方面所取得的研究成果。全书共分为八章,第1章,绪论;第2章和第3章,阐述了移动机器人的全局路径规划问题;第4章和第5章,阐述了移动机器人的局部路径规划问题;第6章,以非完整轮式移动机器人为对象,阐述了其轨迹跟踪问题;第7章,以作者所在单位研制的一台智能移动机器人AWMR-I为研究对象,详细介绍了其组成、结构特点及分析方法,并进行了运动规划及轨迹跟踪控制的实验研究;第8章,结束语,总结归纳了本书取得的研究成果。

本书既可供广大从事机器人研究、开发和应用的教师与科研人员参阅,又可供高等院校机电一体化专业、自动化及相关专业的高年级本科生和研究生阅读。

This book systematically discusses the problems of path planning and trajectory tracking of mobile robot. The contents of the book are composed of global path planning of mobile robot, local path planning of mobile robot and trajectory tracking of nonholonomic wheeled mobile robot (WMR). It includes all research achievements of author in path planning and trajectory tracking of mobile robot in recent years. This book consists of eight chapters; Chapter 1 is an introduction; Chapter 2 and Chapter 3 discuss the problem of global path planning of mobile robot; Chapter 4 and Chapter 5 focus on the problem of local path planning of mobile robot; Chapter 6 studies the problem of trajectory tracking of nonholonomic WMR; Chapter 7, with an intelligent

mobile robot AWMR-I manufactured by author's unit as a research object, firstly, describes the compositions, structural characteristics and analysis methods of AWMR-I in detail; secondly, some experimental researches of motion planning and trajectory tracking on AWMR-I are carried out; Chapter 8 comes to the conclusions of the research.

This book can provide reference for teachers and researchers engaged in robot research, development and application. It can also be read by senior college and graduate students who major in mechatronics, automatic control and relevant fields.

序

机器人是 20 世纪人类最伟大的发明之一，21 世纪将是一个更为广泛地开发与应用机器人技术的时代。移动机器人集环境感知、动态决策与规划、行为控制与执行等多项功能于一身，是一种能够在工作环境中自主移动并完成预定任务的智能系统，是机器人学 and 智能控制的一个重要分支，在工业、农业、民用以及军事等领域具有广泛的应用前景，一直以来也是机器人研究领域中的难点与热点问题，其研究在各个国家均受到广泛关注。

在移动机器人的各项研究与应用中，路径规划与轨迹跟踪是最基本和最重要的问题之一。路径规划是移动机器人研究领域的一项重要研究内容，也是反映移动机器人实现智能化及自主工作的关键技术。路径规划的研究始于 20 世纪 70 年代，目前国内外众多学者仍在从事着大量的研究工作。近年来，随着移动机器人技术和航天技术的发展，非完整系统的控制问题越来越受到世界各国学者的关注。非完整约束广泛存在于轮式移动机器人、柔性机械手、人造卫星及航天飞机等系统中。非完整约束的存在使得这些系统更加难以控制，但是其可控性的特点又使得对其控制问题的研究和工程实现具有挑战性。因此，对于非完整系统的控制问题的研究具有重要的理论意义和广阔的应用前景。轮式移动机器人作为一类常见的和典型的非完整系统，其工作环境存在更多的不确定性，通常要求其跟踪一条已经规划好的可行轨迹，即轨迹跟踪问题，该问题在移动机器人的研究与工程实践中具有重要的应用价值。直至目前，对于移动机器人轨迹跟踪的研究，依然

是机器人学研究领域的热点。

本书针对移动机器人路径规划问题及以轮式移动机器人为研究对象,对其轨迹跟踪问题进行了广泛与深入的研究,是一部比较系统的移动机器人方面的著作。本书内容取材于作者在各种期刊杂志和国际会议上公开发表的学术论文,同时融合了部分国内外学者在该领域的优秀研究成果。全书主题鲜明,逻辑严谨,系统安排确当,可读性好。我相信,本书的出版必将为我国机器人技术的推广和应用发挥一定的促进作用。

诚然,技术的发展是无止境的,作者的这些理论探索与实践应用还需要进一步的细化和深入。希望作者继续努力,百尺竿头,更上一层楼!

中国工程院院士
哈尔滨工业大学教授



2008年3月27日

于机器人技术与系统国家重点实验室

前 言

移动机器人是当今机器人领域研究的热点之一，它涉及人工智能、信息处理、检测与转换等专业技术，跨机械、电子、计算机及自动控制等多种学科，是机器人学和智能控制的一个重要研究领域，在工业、农业、民用及军事等领域具有广泛的应用前景。相对于传统的固定式工业机器人，移动机器人引入了更多的智能性，集中体现了计算机技术和人工智能的最新成果。因此，移动机器人的研究更具挑战性，受到了世界各国的普遍关注。

本书从移动机器人路径规划技术、轨迹跟踪及移动机器人控制体系结构与实现等方面系统地阐述了作者的研究工作，其中大部分研究成果已经在近年来的国内外多个学术期刊和学术会议上发表。本书也是作者近年来从事机器人理论的教学与研究工作的经验积累，在博士学位论文的基础上倾心编著，几易其稿而完成的。

由于移动机器人路径规划与轨迹跟踪的研究方兴未艾，涉及的学科领域很广，因此本书对其研究不可能是全面和系统的。机器人技术研究本身也是一个不断发展、深入和完善的过程，作者所开展的工作仅仅是初步的，有些地方还有探讨的余地，真诚希望本书的出版发行能起到抛砖引玉的作用！

感谢作者的博士生导师，河北工业大学岳宏教授的指导和帮助！感谢天津工程师范学院各级领导的鼓励与大力支持！在本书的编写和出版过程中，也得到了众多领导、专家和教授的热情鼓励和帮助，值此著作即将付梓之际，向他们致以衷心的感谢！

中国工程院院士、著名机器人领域专家、哈尔滨工业大学蔡

鹤皋教授在百忙当中审阅了全部书稿，并欣然作序，使作者深受鼓舞，在此表示诚挚的谢意！

本书的出版承蒙天津工程师范学院学术专著出版基金、机械制造及其自动化天津市重点学科建设基金以及机器人技术与系统国家重点实验室开放研究基金的资助，特致谢忱！书中参阅和引用了大量文献，在此对相关作者表示感谢！另外要特别感谢兵器工业出版社给予我出版学术专著的一个宝贵机会！

囿于作者学识和水平的限制，书中难免存在不当之处，诚望广大读者批评指正。作者 E-mail: wzmin86@126.com。

著者

2008年2月28日

目 录

序	(I)
前 言	(III)
第 1 章 绪 论	(1)
1.1 移动机器人概述	(1)
1.1.1 移动机器人的发展历史	(2)
1.1.2 移动机器人的驱动与转向方式	(5)
1.2 移动机器人路径规划技术	(9)
1.2.1 路径规划技术研究现状	(9)
1.2.2 路径规划技术发展趋势	(14)
1.3 WMR 的轨迹跟踪	(16)
1.3.1 移动机器人的控制	(16)
1.3.2 非完整控制系统	(17)
1.3.3 WMR 的非完整性	(18)
1.3.4 轨迹跟踪问题的研究进展	(20)
1.4 本书主要内容及安排	(22)
1.4.1 本书主要内容	(22)
1.4.2 结构安排	(24)
1.5 本章小结	(26)

第 2 章 基于模拟退火算法的移动机器人全局路径规划	
规划	(27)
2.1 引言	(27)
2.2 移动机器人全局路径规划模型的建立	(28)
2.2.1 基于神经网络的全局环境描述	(28)
2.2.2 路径规划问题的数学建模	(30)
2.3 模拟退火算法	(32)
2.3.1 模拟退火算法的基本原理	(32)
2.3.2 模拟退火算法的求解过程	(34)
2.3.3 计算机仿真实验	(36)
2.3.4 模拟退火算法的操作分析及算法改进	(37)
2.4 基于改进模拟退火算法的移动机器人路径规划	(38)
2.4.1 改进模拟退火算法的基本思想	(38)
2.4.2 算法描述	(39)
2.4.3 计算机仿真实验	(40)
2.5 复合形法与模拟退火新型混合优化算法及其应用	(42)
2.5.1 复合形法的基本思想	(42)
2.5.2 复合形法与模拟退火算法混合优化算法实现	(43)
2.5.3 计算机仿真实验及分析	(44)
2.6 共轭方向法与模拟退火新型混合优化算法及其应用	(47)
2.6.1 共轭方向法基本原理	(47)
2.6.2 新型混合优化算法的实现	(49)
2.6.3 仿真实验及分析	(50)
2.7 三种新型算法比较研究	(53)
2.7.1 三种算法对比	(53)
2.7.2 优化性能分析	(55)
2.8 本章小结	(55)

第 3 章 基于变尺度与微粒群混合算法的移动机器人全局路径规划	(57)
3.1 引 言	(57)
3.2 基于变尺度算法的局部路径优化	(57)
3.2.1 变尺度法原理与基本格式	(57)
3.2.2 局部最优路径的获得	(59)
3.3 微粒群优化算法	(60)
3.3.1 标准 PSO 算法	(60)
3.3.2 算法控制参数分析	(62)
3.4 基于 PSO 算法的全局路径优化	(63)
3.5 路径规划仿真实验与分析	(64)
3.6 算法测试	(66)
3.7 本章小结	(68)
第 4 章 基于强化学习的移动机器人局部路径规划	(69)
4.1 引 言	(69)
4.2 移动机器人 Q 强化学习思想	(69)
4.2.1 强化学习概述	(69)
4.2.2 Q 强化学习算法	(70)
4.2.3 Q 强化学习算法的收敛性分析	(72)
4.3 基于 CMAC 的 Q 强化学习算法实现	(73)
4.3.1 CMAC 神经网络模型	(74)
4.3.2 Q 函数的 CMAC 神经网络实现	(75)
4.4 移动机器人局部路径规划仿真	(77)
4.4.1 移动机器人模型	(77)
4.4.2 克服陷阱行为设计	(77)
4.4.3 避碰行为设计	(78)
4.4.4 仿真实验研究	(79)

4.5	本章小结	(81)
第5章 基于VFH+及遗传算法的移动机器人局部路径规划		
	路径规划	(82)
5.1	引言	(82)
5.2	基于栅格法的环境地图建模	(83)
5.2.1	基于反推传感器模型的占有栅格地图	(83)
5.2.2	基于对数几率比的占有栅格制图算法	(86)
5.3	VFH+算法的基本思想	(87)
5.3.1	主极坐标柱状图	(87)
5.3.2	二元极坐标柱状图	(90)
5.3.3	屏蔽极坐标柱状图	(90)
5.3.4	移动机器人运动方向的确定	(93)
5.3.5	仿真实验	(94)
5.4	基于遗传算法的动态环境下移动机器人路径规划	(95)
5.4.1	遗传算子设计	(95)
5.4.2	算法参数选择	(99)
5.4.3	算法终止条件	(100)
5.4.4	仿真系统开发及实验研究	(101)
5.5	本章小结	(104)
第6章 非完整轮式移动机器人的轨迹跟踪		
6.1	引言	(105)
6.2	基于Lyapunov函数的轮式移动机器人轨迹跟踪	(106)
6.2.1	WMR动力学与运动学模型	(106)
6.2.2	轨迹跟踪问题描述	(108)
6.2.3	跟踪控制器设计	(109)
6.2.4	仿真实验	(110)
6.3	轮式移动机器人自适应轨迹跟踪	(113)

6.3.1	考虑电机动态性能的 WMR 动力学模型	(113)
6.3.2	控制器设计	(114)
6.3.3	仿真实验	(117)
6.4	轮式移动机器人轨迹跟踪的最优控制	(120)
6.4.1	WMR 动态特性分析	(120)
6.4.2	控制系统模型	(121)
6.4.3	电机运动学模型	(122)
6.4.4	自适应遗传算法	(123)
6.4.5	自适应遗传算法对于 LQR 的优化	(124)
6.4.6	仿真实验	(127)
6.5	轮式移动机器人轨迹跟踪的预测控制	(128)
6.5.1	预测控制的基本思想	(128)
6.5.2	WMR 运动建模与分析	(128)
6.5.3	WMR 运动预测控制	(130)
6.5.4	仿真实验	(132)
6.6	轮式移动机器人轨迹跟踪的模糊控制	(134)
6.6.1	模糊控制器设计	(134)
6.6.2	基于复合形法的模糊控制器优化	(136)
6.6.3	仿真实验及分析	(140)
6.7	本章小结	(141)
第 7 章	移动机器人 AWMR-I 的研制与实验研究	(143)
7.1	引 言	(143)
7.2	AWMR-I 感知系统设计	(144)
7.2.1	超声波传感器	(144)
7.2.2	红外传感器	(147)
7.2.3	传感器布局设计	(149)
7.3	AWMR-I 运动控制系统设计	(150)

7.3.1	驱动单元设计	(150)
7.3.2	伺服驱动器	(151)
7.3.3	运动控制系统硬件	(153)
7.3.4	运动控制系统软件	(154)
7.4	AWMR-I 整体结构与参数	(155)
7.5	AWMR-I 运动规划研究	(156)
7.5.1	AWMR-I 的运动学建模	(156)
7.5.2	驱动轮间的约束关系	(157)
7.5.3	运动学方程	(158)
7.5.4	两种方法对比分析	(159)
7.5.5	实验研究	(160)
7.6	WMR 非线性系统的输入/输出线性化	(162)
7.6.1	一般非线性系统的输入/输出线性化	(162)
7.6.2	WMR 的输入/输出线性化	(163)
7.6.3	AWMR-I 轨迹跟踪实验	(165)
7.7	AWMR-I 轨迹跟踪最优控制的实验研究	(169)
7.8	本章小结	(172)
第 8 章	结束语	(173)
参考文献	(175)
跋	(184)

CONTENTS

Foreword	(I)
Preface	(III)
Chapter 1 Introduction	(1)
1.1 Surveys of mobile robot	(1)
1.1.1 Developments of mobile robot	(2)
1.1.2 Driving and turning of mobile robot	(5)
1.2 Path planning of mobile robot	(9)
1.2.1 Research actualities of path planning	(9)
1.2.2 Developing trends of path planning	(14)
1.3 Trajectory tracking of WMR	(16)
1.3.1 Control of mobile robot	(16)
1.3.2 Nonholonomic control system	(17)
1.3.3 Nonholonomic characters of WMR	(18)
1.3.4 Research evolutions of trajectory tracking	(20)
1.4 Main contents and arrangement of the book	(22)
1.4.1 Main contents	(22)
1.4.2 Frame arrangement	(24)
1.5 Summary	(26)
Chapter 2 Global path planning of mobile robot based on SAA	(27)
2.1 Introductions	(27)
2.2 Modelling of mobile robot global path planning	(28)
2.2.1 Environment descriptions with neural networks ...	(28)

2.2.2	Mathematical model of path planning	(30)
2.3	Simulated annealing algorithm(SAA)	(32)
2.3.1	Principles of SAA	(32)
2.3.2	Processes of SAA	(34)
2.3.3	Simulation experiments	(36)
2.3.4	Operations and modifications of SAA	(37)
2.4	Mobile robot path planning based MSAA	(38)
2.4.1	Basic ideas of MSAA	(38)
2.4.2	Descriptions of algorithm	(39)
2.4.3	Simulation experiments	(40)
2.5	Compound shape and SAA new hybrid optimal algorithm and its applications	(42)
2.5.1	Basic ideas of compound shape algorithm	(42)
2.5.2	Realizations of new hybrid optimal algorithm formed by compound shape algorithm and SAA	(43)
2.5.3	Simulation experiments and analysis	(44)
2.6	Conjugate direction and SAA new hybrid optimal algorithm and its applications	(47)
2.6.1	Principles of conjugate direction algorithm	(47)
2.6.2	Realizations of new hybrid optimal algorithm	(49)
2.6.3	Simulation experiments and analysis	(50)
2.7	Comparison researches of three new optimal algorithms	(53)
2.7.1	Comparisons of three new optimal algorithms	(53)
2.7.2	Analysis of optimal performances	(55)
2.8	Summary	(55)
Chapter 3 Path planning of mobile robot with VM and PSO hybrid algorithm		
		(57)
3.1	Introductions	(57)
3.2	Local path optimization based on VM algorithm	(57)